

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS PULSOS DE ALTA DENSIDAD DE CORRIENTE  
SOBRE EL DESGASTE DE FLANCO EN BURIL HSS**

**FELIPE ARISTIZABAL CUARTAS**

**Trabajo de grado realizado como requisito para aspirar  
al título de Tecnólogo en Mecánica**

**Director:  
Carlos Alberto Montilla Montaña  
Ingeniero Mecánico - M. Sc.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA  
PEREIRA  
2018**

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	3
RESUMEN .....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:.....	6
2. JUSTIFICACIÓN .....	8
3. METODOLOGÍA.....	9
4. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....	11
4.1 Objetivo general .....	11
4.2 Objetivo específicos .....	11
5. MARCO TEORICO.....	11
5.1 ELECTROPLASTICIDAD .....	11
5.1.1 Flujo de corriente eléctrica .....	11
5.1.2 Teorías de electroplasticidad previas .....	14
5.1.3 Calentamiento localizado .....	14
5.1.4 Efecto viento de electrones.....	16
5.1.5 explicación de la teoría electro plástica compresiva.....	17
5.1.6 Corriente eléctrica sin deformación del metal.....	17
5.1.7 Corriente eléctrica con deformación eléctrica.....	21
5.1.8 Efectos de la corriente eléctrica en la conformabilidad.....	24
5.2 TEORIA DE CORTE DE LOS METALES .....	27
5.3 PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	35
6. CONCLUSIONES.....	57
7. BIBLIOGRAFIA .....	59

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Vista general de torno revolver ZPS de la UTP, y conexión del generador de pulsos a barra de acero. ....	6
<b>Figura 2.</b> La dislocación de borde se representada como un núcleo de dislocación cilíndrica rodeado por un libre-defecto de enrejado. ....	13
<b>Figura 3.</b> Foto instantánea de la respuesta transitoria en el calentamiento del fenómeno Joule como resultado a dislocaciones mayores en el núcleo de la resistencia eléctrica. ....	16
<b>Figura 4.</b> Interconexión fallida por electro migración .....	17
<b>Figura 5.</b> Resultados del flujo de tensión experimental del comportamiento de temperatura para el ensayo de procedimiento eléctrico estacionario. ....	19
<b>Figura 6.</b> Resultados del flujo de tensión experimental EAF para aplicación de un solo pulso de corriente eléctrica durante la conformación incremental. ....	19
<b>Figura 7.</b> Resultados experimentales del flujo de estrés comparando conformación incremental RT y EAF.....	20
<b>Figura 8.</b> Resultados experimentales EAF de flujo de tensión y efectos de espécimen de enfriamiento durante EAF. ....	22
<b>Figura 9.</b> Resultados experimentales EAF de flujo de tensión (Parámetros set 1). ....	23
<b>Figura 10.</b> Ensayos de titanio Grado 5 isotérmico vs EAF.....	23
<b>Figura 11.</b> Etapas de fracturas dúctiles. A. Región inicial de cuello. B. Formación de Micro-huecos. C. Coalescencia de mayores huecos. ....	24
<b>Figura 12.</b> Temperatura vs porcentaje de trabajo en frio en relación para SS304. Las temperaturas de ensayo eléctrico-estacionarias con la misma densidad de corriente aumentaron a medida que se incrementa el porcentaje inicial de trabajo en frio.....	25
<b>Figura 13.</b> Sistema cartesiano y sus ejes de orientación.....	30
<b>Figura 14.</b> Planos de situación .....	31
<b>Figura 15.</b> Copa y Punta .....	35
<b>Figura 16.</b> Caras de Herramienta.....	36
<b>Figura 17.</b> Torno revolver ZPS, R5, utilizado en la experimentación .....	37
<b>Figura 18.</b> Codificación Norma ISO 3002/1 .....	38
<b>Figura 19.</b> Buriles utilizados en las pruebas de torneado .....	38
<b>Figura 20.</b> Especificación de la herramienta utilizada. Fuente: Organización internacional de normalización.....	39
<b>Figura 21.</b> Esquema real de montaje para torneado acero rápido HSS.....	39
<b>Figura 22.</b> Montaje del generador de pulsos. Parte superior: osciloscopio Fluke 123; parte intermedia: generador de pulsos. Parte inferior: transformador de voltaje de alimentación del generador de pulsos. ....	42
<b>Figura 23.</b> Equipo DSP Logger MX 300 utilizado .....	44
<b>Figura 24.</b> Esquema de montaje de los acelerómetros .....	44
<b>Figura 25.</b> Rugosímetro JS201 P utilizado .....	45
<b>Figura 26.</b> Material de suministro .....	46

<b>Figura 27.</b> Soporte metálico .....	47
<b>Figura 28.</b> Ruta de trabajo .....	47
<b>Figura 29.</b> Formato para el registro de información .....	48
<b>Figura 30.</b> Montaje y conexión de los instrumentos de medida para la experimentación. ....	49
<b>Figura 31.</b> Medición del desgaste de flanco con el software <i>Draftsight</i> 2015.....	50
<b>Figura 32.</b> Información HSS-S EPT .....	51
<b>Figura 33.</b> Información HSS- EPT.....	53
<b>Figura 34.</b> Proceso de medición de virutas en el software <i>Draftsigh</i> .....	53
<b>Figura 35.</b> Medición del desgaste de flanco HSS.....	54
<b>Figura 36.</b> Comportamiento típico de desgaste de flanco de una herramienta por arranque de viruta.....	54
<b>Figura 37.</b> Desgaste de flanco en herramienta HSS.....	55
<b>Figura 38.</b> Esta viruta hecha por un proceso de torneado con buril HSS que se obtuvo de este trabajo.....	57
<b>Figura 39.</b> Tipos de viruta obtenidas en torneado, de acuerdo a norma ANSI/ASME B94.55M .....	57

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Material de magnesio y paramentos de enrejado .....	14
<b>Tabla 2.</b> Generación de Superficies. Máquinas de arranque de viruta.....	28
<b>Tabla 3.</b> Programación para estudio del efecto de EP sobre vida útil de herramientas HSS .....	40
<b>Tabla 4.</b> Parámetros de material, corte y pulsos.....	43
<b>Tabla 5.</b> Resultados de rugosidad media y desviación.....	54
<b>Tabla 6.</b> Resultados de espesores de viruta.....	54
<b>Tabla 7.</b> Dimensiones de viruta recalcada.....	55

## RESUMEN

Uno de los parámetros más importantes para el conformado de piezas es la maquinabilidad que puede definirse como el mejor manejo de los materiales y la facilidad con la que se pueden maquinar por medio de arranque de viruta. La maquinabilidad se puede evaluar de diversas maneras, entre ellas en función del desgaste en el filo de la herramienta.

En esta investigación que se realizó en la Universidad Tecnológica de Pereira, hubo un trabajo colaborativo entre docentes y estudiantes, para realizar un ensayo de maquinabilidad, destinado a conocer el comportamiento de una determinada herramienta de corte (buril HSS), con un determinado material de pieza (acero AISI/SAE 1045), pero introduciendo una variante al proceso, la afectación con un tren de pulsos de alta densidad de corriente, frecuencia, y con determinado ancho. Los pulsos son proporcionados por un generador que fue diseñado y construido específicamente para esta investigación.

Se aplicó un ensayo para así determinar el desgaste de la herramienta, y conocer el desgaste de flanco  $h_f$  (en la cara de incidencia), las vibraciones y la variación del acabado superficial.

Los resultados obtenidos muestran un cambio en la forma y las dimensiones de las virutas, en los acabados superficiales de las probetas y una reducción en las vibraciones mecánicas durante el proceso de mecanizado.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

Desde el año 2012, y en el marco de un trabajo colaborativo entre profesores de la Universidad Politécnica de Cataluña UPC (España), y la Universidad Tecnológica de Pereira UTP, se viene desarrollando una investigación orientada al “Estudio y aplicación del fenómeno de la electroplasticidad en procesos de torneado de metales”.

En esta investigación se tornea una pieza, bien sea con buril HSS o con inserto metálico HM, mientras simultáneamente se hace pasar un tren de pulsos eléctricos, a una cierta frecuencia, y con determinado ancho. Los pulsos son proporcionados con un generador de pulsos diseñado y construido específicamente para esta investigación (Figura 1). La intención del proyecto de investigación original es indagar sobre los efectos (benéficos o no) de los electropulsos en relación a varios aspectos: la maquinabilidad del material, el consumo de potencia de la máquina, los acabados dimensionales y superficiales de la pieza maquinada, y propiedades mecánicas del material torneado.

**Figura 1.** Vista general de torno revolver ZPS de la UTP, y conexión del generador de pulsos a barra de acero.



**Fuente:** Montilla M., Carlos Alberto

El torneado de metales con la asistencia de pulsos de corriente de alta densidad, es un proceso novedoso, y es modelado parcialmente por la mecánica convencional de corte de metales por arranque de viruta, razón por la cual su estudio y modelado es pertinente [1].

Para el desarrollo de la investigación se han planteado una serie de cuestionamientos e hipótesis [1]:

**Cuestionamiento 1.1** ¿Qué propiedades mecánicas y metrológicas de la pieza torneada mejorarán o empeorarán después de ser expuesta al torneado asistido por pulsos de corriente de alta densidad?

**Cuestionamiento 1.2** ¿Qué parámetros de trabajo del generador de pulsos de corriente eléctrica, afectan el fenómeno de la electroplasticidad en los materiales metálicos?

**Hipótesis 1.** El acabado superficial, las tensiones residuales superficiales y el comportamiento a fatiga, entre otros parámetros, mejoran con la aplicación de la electroplasticidad.

**Cuestionamiento 2** ¿Permitirá la aplicación de la electroplasticidad en los procesos de torneado, mejorar parámetros de fabricación tales como la fuerza de corte, la potencia necesaria para el corte, las velocidades de rotación y avance?

**Hipótesis 2.** La maquinabilidad de un material se puede mejorar temporalmente en un proceso de torneado asistido por electroplasticidad, modificando los valores de densidad de corriente, la frecuencia y duración de los pulsos de corriente eléctrica.

**Cuestionamiento 3.1** ¿Ocurrirán cambios físicos en las herramientas de corte, al torner con la asistencia de pulsos de corriente de alta densidad?

**Cuestionamiento 3.2** ¿Será posible que el proceso de torneado asistido por electroplasticidad, pueda realizarse a mayores velocidades y menores esfuerzos que en el torneado convencional, obteniendo iguales o mejores resultados en cuanto a propiedades mecánicas (dureza) y metrológicas (rugosidad) del material?

**Hipótesis 3.** Al asistir el torneado con electroplasticidad, se mejora transitoriamente la maquinabilidad del material, disminuyendo las fuerzas ejercidas por la herramienta y la correspondiente potencia suministrada por la máquina, haciendo que el proceso sea más rentable.

**Cuestionamiento 4.1** ¿Se podrá establecer alguna explicación teórica del comportamiento físico del material frente a este fenómeno?

**Cuestionamiento 4.2** ¿Se dispondrán de las suficientes premisas para elaborar un modelo físico y matemático del proceso de torneado asistido con electroplasticidad?

**Cuestionamiento 4.3** ¿Está al alcance del conocimiento actual, elaborar un modelo físico y matemático del proceso de torneado asistido con electroplasticidad?

**Hipótesis 4.** Las simulaciones computacionales por métodos de elementos finitos o diferencias finitas permitirán aportar más información del comportamiento físico de los metales, ante la influencia del fenómeno de la electroplasticidad, además de ayudar a optimizar los parámetros de operación del proceso de torneado asistido por electroplasticidad.

Para dar respuesta a los cuestionamientos **1.1**, **1.2** e hipótesis **1**, se ha venido desarrollando el proyecto de investigación titulado “Desarrollo de una metodología para torner piezas,

con la asistencia de pulsos de corriente de alta densidad (teoría de corte y electroplasticidad), código 8 – 13 – 3. Este proyecto de investigación está financiado por la Vicerrectoría de investigaciones, innovación y extensión de la UTP, y ya dispone de resultados, los cuales se pueden consultar en las referencias [2], [3] y [4].

Para dar respuesta al cuestionamiento 2 e hipótesis 2, se ha venido desarrollando el proyecto de investigación titulado “Estudio de los efectos de los pulsos de corriente eléctrica en el comportamiento mecánico y metalúrgico en metales ensayados a tracción”, código 8–15-1. Este proyecto de investigación igualmente está financiado por la Vicerrectoría de investigaciones, innovación y extensión de la UTP, ya se ha llevado a cabo su ejecución física y en laboratorio, y está en la etapa de procesamiento de información, para poder publicar resultados.

Para dar respuesta al cuestionamiento 3.1, se hace necesario desarrollar el estudio objeto del presente trabajo de grado, titulado: **“Estudio del efecto de los pulsos de alta densidad de corriente sobre el desgaste de flanco en buril HSS”**

La ejecución del presente proyecto pretende entonces servir de apoyo en el desarrollo del proyecto de tesis titulado “Estudio y aplicación del fenómeno de la electroplasticidad en procesos de torneado de metales”.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Desde mediados del siglo XX y en lo que va del siglo XXI numerosos investigadores en el mundo, continúan refinando los componentes científicos y tecnológicos de las *Teorías de corte de materiales* para ponerse a la par con los sucesivos avances en las ingenierías de materiales, de máquinas y de herramientas de corte, con el objetivo de optimizar o desarrollar los siguientes componentes del proceso tecnológico:

- Los materiales de las herramientas de corte ([5], [6] y [7], [8])
- Lubricantes de corte, nuevos y más amigables (desde el punto de vista del medio ambiente) ([9])
- Los parámetros o condiciones de corte, en aras de minimizar las deformaciones en las piezas fabricadas, [10] y [11].
- Las condiciones o parámetros de corte, ([12], [13], [14] y [15]), en función de minimizar el consumo e impacto energético, dadas las nuevas necesidades del mundo, bajo el enfoque de Desarrollo sostenible.

Dadas las actuales tendencias de desarrollo sostenible en maquinado, dirigidas a propiciar la creación y aplicación de procesos de manufactura amigables desde los puntos de vista de los consumos de energéticos y de la generación y disposición de residuos finales ([12], [13] y [14] y [15]), diversos investigadores han hecho esfuerzos interesantes en la creación de procesos *híbridos* entre procesos convencionales PC y procesos no convencionales



PNC, con el fin de atender dichos requerimientos; el esfuerzo de dichos investigadores está orientado a desarrollar procesos *híbridos* de aplicación en el ámbito industrial, con lo cual se impacte positivamente el consumo energético y la generación y disposición de residuos finales.

En relación con lo anterior, se encuentran estudios con resultados muy interesantes en los campos de *Fresado de carburo de silicio SiC asistido con descargas eléctricas ([16])*, *Procesos de rectificado y acabado electroquímico aplicados en torneado ([17])*, *Diseño de acabado superficial de formas libres en acabado electroquímico asistido por bruñido ([18])* y *Nuevos usos de corrientes y campos eléctricos en el procesamiento por metalurgia de polvos metálicos ([19] 2000)*.

El nuevo proceso de *torneado de piezas, asistido por el fenómeno de pulsos de corriente de alta densidad* quedaría enmarcado entonces como un *proceso híbrido*, (combinación de corte y arranque de viruta con proceso electro físico), y bajo un enfoque de sostenibilidad, en el cual como hipótesis preliminares frente al torneado convencional, se espera mejorar el acabado superficial y disminuir la potencia necesaria para el corte.

Al mezclar exitosamente el torneado convencional con el fenómeno de electroplasticidad, a futuro se estaría impactando favorablemente la productividad de las industrias dado que:

- Se disminuirá la potencia de maquinado, por lo tanto el consumo energético y el costo del proceso.
- Se preservará la vida útil de la herramienta, con lo cual disminuirán tiempos muertos para su recambio, con la consecuente reducción de costos.
- Dada la reducción transitoria de los esfuerzos de fluencia y rotura, será posible mecanizar ciertos materiales duros o templados, sin necesidad de recocerlos, templarlos y revenirlos, o de acudir a PNC.

Con este estudio los resultados de este proyecto se puedan utilizar de base para concretar de manera preliminar, los beneficios que se pueden obtener con la aplicación de los electropulsos en los procesos de arranque de viruta y en el desgaste de las herramientas de corte utilizadas para ello.

### 3. METODOLOGÍA

**Etapa 1. Definición de las variables de entrada del experimento: material (tipo, tamaño y forma) a mecanizar, velocidad de rotación, profundidad de corte, velocidad de avance, ancho de pulsos, frecuencia de pulsos.**

**Actividad 1.1:** Realización de un diseño básico de experimento, para definir las variables de entrada del experimento. Este diseño debe prever el montaje real en máquina.

**Actividad 1.2:** De acuerdo al material seleccionado, se determinarán los parámetros de corte.

**Actividad 1.3:** Selección de ancho y frecuencia de pulsos de corriente.

## **Etap 2. Definición de un protocolo de experimentación en cuanto a variables de salida.**

**Actividad 2.1:** Definición de las variables de salida a ser medidas, durante y después de la ejecución de la experimentación, teniendo en cuenta su disponibilidad en la Universidad Tecnológica de Pereira.

**Actividad 2.2:** Definición de aplicativos de software a ser empleados en el post procesamiento de información.

## **Etap 3. Preparar probetas e instrumentación necesaria para la experimentación.**

**Actividad 3.1:** Definición de forma y tamaño de las probetas. Fabricación de las mismas.

**Actividad 3.2:** Fabricación de utillajes necesarios para completar el montaje físico previo en los numerales 1.1 y 2.1.

## **Etap 4. Ejecutar pruebas preliminares.**

**Actividad 4.1:** Montaje y puesta a punto del equipamiento.

**Actividad 4.2:** Pruebas real de ensayos y correcciones necesarias.

## **Etap 5. Desarrollo del experimento y registro de lecturas.**

**Actividad 5.1:** Definición de formatos necesarios para el registro y recolección de la información.

**Actividad 5.2:** Ejecución del ensayo planteado.

## **Etap 6. Procesar la información entrada /salida.**

**Actividad 6.1:** Recolectar, organizar y compilar información de entrada/salida.

**Actividad 6.2:** Análisis de datos obtenidos.

## **Etap 7. Presentar la información de variación del desgaste de flanco, con y sin asistencia de pulsos de corriente de alta densidad.**

**Actividad 7.1:** Desarrollar un informe con todos los datos conseguidos.

**Actividad 7.2:** Publicación de resultados.

## **4. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el efecto de los pulsos de alta densidad de corriente sobre el desgaste de flanco en buril HSS.

### **4.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- Definir un protocolo de experimentación en cuanto a variables de entrada: material (tipo, tamaño y forma) a mecanizar, velocidad de rotación, profundidad de corte, velocidad de avance, ancho de pulsos, frecuencia de pulsos.
- Definir un protocolo de experimentación en cuanto a variables de salida: vibraciones pico radial y axial, acabado superficial de la pieza y desgaste de flanco.
- Preparar probetas e instrumentación necesaria para la experimentación.
- Ejecutar pruebas preliminares.
- Desarrollar la experimentación y registrar las correspondientes lecturas.
- Procesar la información entrada /salida.
- Presentar la información de variación del desgaste de flanco, al torneear con buril HSS, con y sin asistencia de pulsos de corriente de alta densidad.

## **5. MARCO TEORICO**

### **5.1 ELECTROPLASTICIDAD**

Este capítulo describe los fundamentos detrás de la electroplasticidad en los metales. Especialmente, se enfoca en el flujo de la corriente eléctrica, las teorías de electroplasticidad, y una explicación general en el efecto de electroplasticidad en los metales. Esta teoría en general será soportada con resultados experimentales y las conclusiones de electroplasticidad serán mostradas al final del capítulo.

#### **5.1.1 Flujo de corriente eléctrica**

Cuando un campo eléctrico es aplicado a un material, hay una fuerza ejercida sobre electrones libres (i.e., electrones balanceados) tanto así que experimentan aceleración opuesta al campo eléctrico, como resultado de su carga negativa. Idealmente, los electrones aceleraran continuamente de tal manera que la corriente siempre incrementara con el tiempo. Sin embargo, las fuerzas de fricción internas (i.e., colisión de electrones con núcleos de iones) dentro del límite de aceleración de electrones, donde se asientan a un valor constante de corriente. Estas colisiones en la red eléctrica (volumen específico) resistividad del material. La resistividad eléctrica del material es caracterizada por la estructura atómica, espaciado, y unión. Sin embargo, la resistividad eléctrica es

incrementada por un número de dislocaciones, defectos puntuales, y defectos interfaciales (i.e., límites de grano, grietas, huecos) dentro del enrejado. La resistividad eléctrica total puede ser descrita por la regla de Matthiessen, según la fórmula (1):

$$\rho_{e\_total} = \rho_o + \rho_i + \rho_d \quad (1)$$

Donde

**$\rho_{e\_total}$**  : Resistividad eléctrica total

**$\rho_o$**  : Idealmente perfecta y pura resistividad de cristal que incluye la influencia de la contribución térmica vibratoria

**$\rho_i$**  : Contribución debida a la red

**$\rho_d$**  : Contribución a la deformación plástica [21].

Además, se asume que los mecanismos actúen independientemente dentro del material. Cuando se aplica un campo eléctrico, los electrones se aceleran y dispersan, fuera de los defectos mencionados y los núcleos de iones vibran por sí mismos. La dispersión localizada en los defectos causa que los electrones pierdan energía cinética y cambien de dirección. Sin embargo, los electrones mantienen un movimiento neto (i.e., corriente) en la dirección puesta del campo aplicado. Este movimiento neto puede ser descrito por la velocidad de arrastre del electrón, la cual es la velocidad promedio en la dirección de fuerza aplicada. La velocidad de arrastre del electrón según la fórmula (2):

$$v_d = \frac{I}{n|e|A} \quad (2)$$

Donde

**$I$**  : Magnitud de corriente,

**$n$**  : Número de valencia de electrones por unidad de volumen,

**$e$**  : Carga de un electrón,  **$A$**  es el área de sección transversal que la corriente pasa a través de ella [21].

La velocidad de arrastre está en el orden de algunos mm/s para las magnitudes de corriente eléctrica durante EAF.

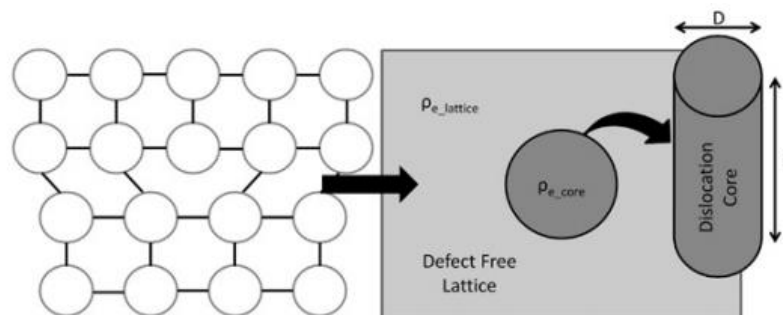
El concepto de dispersión de electrones de los defectos de material y núcleos de iones es conocido como Joule o calentamiento resistivo. Como los electrones son acelerados por un campo eléctrico, ellos aceleran y alcanzan solamente una velocidad que usualmente está por debajo de la velocidad de Fermi (~1,800,000m/s) y mucho más por debajo de la velocidad de la luz (300 millones m/s), como resultado de colisiones del material. La velocidad de Fermi es la más rápida posible de un electrón en un material que esta enfriado por debajo de cero Kelvin. Por lo tanto, a cero kelvin, la velocidad de Fermi de un electrón es derivado de la energía cinética igual a la de Fermi. Durante las colisiones, los electrones transfieren energía cinética a los núcleos de iones, ya que incrementa la energía vibraciones de los núcleos de iones. Este incremento en energía vibracional causa un aumento en la temperatura del material. Por lo tanto, cuando se considera una masa mayor de material, los núcleos de iones alrededor de los defectos del material tendrán mayor energía vibracional (i.e., mayor temperatura) debido a las distorsiones enrejados y una mayor frecuencia de interacción núcleo ion/electrón. Hay una mayor frecuencia de

interacción núcleo ion/electrón dado por la desalineación de los núcleos de iones. En comparación, los defectos libres en regiones de enrejado tendrán un menor incremento de energía vibracional dado al mismo flujo de electrones aplicado mediante el enrejado. Aunque el flujo es el mismo, la región detectada no lo hará incurrir como muchas interacciones de núcleo ion/electrón a la estructura enrejada alineada. Como resultado, la energía incrementada será menor. Además, la energía vibracional ganada en cada región (i.e., defecto y libre defecto) proveerá o ganará energía de sus núcleos de iones vecinos.

Esto crea gradientes de energía vibracional o gradientes térmicos en el nivel de núcleo de iones. Desde una perspectiva de enrejado, esto se traslada a una energía de vibración promedio del núcleo de iones dentro del grano (i.e., temperatura media del grano). En general, la colección de temperatura media de grano y calentamiento a límites de grano relaciona a la temperatura macro-observada. Esta macro o aumento de temperatura es lo que es típicamente medido durante pruebas experimentales; sin embargo, hay mayores temperaturas pico (i.e., energía vibracional) alrededor de defectos dentro del material enrejado.

Al comparar el calentamiento de Joule para elevar la temperatura de un material por convección (e.g., en un horno), la energía vibracional promedio de los núcleos de iones se haría incrementar en el enrejado. Sin embargo, la energía vibracional no tendría áreas con mayores cantidades de energía alrededor de sitios defectuosos ya que no hay una interacción directa al igual que el flujo eléctrico. Así, el calentamiento por convección proporcionará una onda transitoria de energía vibracional desde la superficie exterior. Sin embargo, una vez el material es completamente calentado y humectado a la temperatura elevada, la energía vibracional será uniforme dentro del material enrejado. Este es uno de los aspectos beneficiarios usando EAF sobre la formación de temperatura elevada convencional.

**Figura 2.** La dislocación de borde se representada como un núcleo de dislocación cilíndrica rodeado por un libre-defecto de enrejado.



**Fuente:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

Aparte de usar una observación detallada para cuantificar este fenómeno, [22-23] este capítulo introduce modelos basados en la física para determinar el significado de las presentes teorías de electroplasticidad. Específicamente, la energía transitoria proporciona al núcleo de dislocaciones y transferirá alrededor del enrejado que será comparado y

cuantificado. Un esquema es mostrado en la figura 2 donde la dislocación de borde es representada por una dislocación de núcleo cilíndrica. La geometría del núcleo es caracterizada por un cilindro circular recto con un diámetro (D) y longitud (L). El diámetro usado en este trabajo proporciona un área equivalente al área de dislocación de núcleo que es representada por una sección transversal elíptica.

### 5.1.2 Teorías de electroplasticidad previas

Las dos primeras teorías principales para la electroplasticidad se localizan calentando a defectos de enrejado [24-25] y el efecto del viento en el electrón [26-27]. El trabajo más reciente sobre la teoría de electroplasticidad sugiere que los dos fenómenos ocurren simultáneamente cuando una corriente eléctrica es aplicada durante la deformación [23]. Este trabajo compara la magnitud de energía de estas dos como relación al movimiento de un núcleo de dislocaciones en un enrejado metálico.

### 5.1.3 Calentamiento localizado

El calentamiento localizado es un resultado de aumento de dispersión en los defectos, el cual crea áreas de zonas de mayores vibraciones atómicas o “puntos calientes” (i.e., el efecto de calentamiento de Joule incrementado a sitios de defecto), mientras el efecto del viento de electrones es basado en el momento actual de transferencia al núcleo de dislocación. En las dos secciones siguientes, el caso de estudio se realiza por cada teoría asumiendo que la presente densidad (J) de  $100 \text{ A/mm}^2$  es aplicada a un magnesio metálico puro tal que la magnitud de la influencia puede ser determinada. Paramentos de material crítico y de enrejado están dados en la tabla 1.

**Tabla 1.** Material de magnesio y paramentos de enrejado

$\rho_0$ (defect-free lattice)	4.101	$\mu\Omega \text{ cm}$
$\rho_d$ (dislocation core)	28.707	$\mu\Omega \text{ cm}$
$\rho$	1740	$\text{kg/m}^3$
$D$	0.587	nm
$A$	0.271	$\text{nm}^2$
$L$	6000	nm
$V$	1,623.743	$\text{nm}^3$
$n$	$4.309 \times 10^{28}$	Atoms/ $\text{m}^3$
$N_{\text{core}}$	69,921	Atoms
$Q$	135	KJ/mol
$Z^*$	-2	
$e$	$-1.602 \times 10^{-19}$	C
$b$	$3.209 \times 10^{-10}$	m

**FUENTE:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

La energía localizada proporcionada al núcleo de dislocación debido al calentamiento del efecto de Joule viene dado por (3)

$$E_{Joule} = J^2 \rho_d V \Delta t \quad (3)$$

Donde  $J$  es la densidad presente,  $\rho_d$  es la resistividad eléctrica del núcleo de dislocación,  $V$  es el volumen del núcleo, y  $t$  es el tiempo de la aplicación de la corriente. Se plantea la hipótesis que estos “puntos calientes” movimientos facilitan la dislocación a través del enrejado y permitir que ellos pasen por otros defectos de enrejado no-movibles. Usando una densidad de corriente de 100 A/mm<sup>2</sup> aplicada durante un segundo, esto resulta en  $4.657 \times 10^{-15}$  J o 29,069 eV de energía que es aplicada al núcleo de dislocación. La densidad eléctrica del núcleo de dislocación está determinada aproximadamente de seis a ocho veces la resistencia eléctrica del defecto libre del enrejado [28]. Esto fue determinado por Kino et al. [28] donde se llevaron a cabo experimentos cuidadosamente para medir muestras con variación de densidades de dislocación. Para este análisis, un factor de siete fue usando durante los cálculos como promedio de los resultados publicados por Kino et al. La importancia de una cantidad de energía cuantificada al núcleo puede ser comparada con la energía actual ( $Q$ ) para la difusión de enrejado en magnesio. La energía de activación, difusión y enrejado es la energía requerida para mover un núcleo de iones de un enrejado a otro durante la deformación. Por lo tanto, la energía de activación para el magnesio es aproximadamente 1.4 eV/átomo y esto equivale a una energía de activación de 97,867 eV para todo un núcleo de dislocación. Por lo tanto, la energía adicional calculada dada por el calentamiento de Joule en el núcleo de dislocación es ligeramente menor que 1/3 de la energía de activación requerida para mover el núcleo de dislocación una distancia atómica. Desde un punto de vista importante, eso tendrá un efecto significativo en la movilidad del núcleo y reducirá el estrés mecánico requerido para desplazar dislocaciones en el enrejado del material. Cabe señalar que todo el núcleo de dislocación no se mueve toda de una vez, pero algunas regiones del núcleo avanzan a través del enrejado con el tiempo. Esto no afecta los resultados presentados cuando examinan la magnitud entre el calentamiento de Joule y el efecto del viento de electrones.

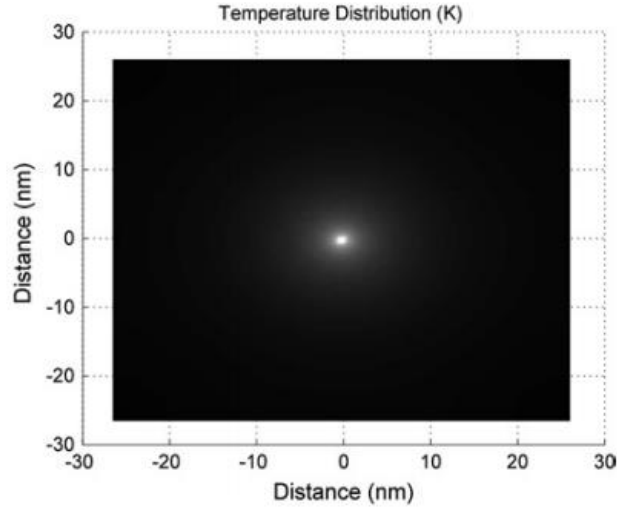
$$\Delta T = \frac{J^2 \rho_e}{\rho c} \Delta t \quad (4)$$

Además, el efecto de calentamiento de Joule localizado puede ser cuantificado como una temperatura aumentada en donde  $\Delta T$  es el aumento de temperatura,  $J$  es la densidad actual,  $\rho_e$  es la resistividad eléctrica del área de interés,  $\Delta t$  es el cambio en el tiempo,  $\rho$  es la densidad, y  $c$  es el calor específico. Debido a la diferencia en la resistividad eléctrica entre el libre defecto de enrejado y el núcleo de dislocación, la magnitud de temperatura es escalada linealmente desde la variación en resistividad (i.e., el núcleo de dislocación es siete veces más caliente que el enrejado de libre defecto) de acuerdo con la Eq. (4). para caracterizar este efecto, un modelo simplificado el cual incluye transferencia de calor transitoria por conducción desde una malla notal 2D mostrada en la Fig. 2.

Este modelo fue producido para comprender para comprender la generación de calor y la disipación durante el calentamiento de Joule alrededor del núcleo de dislocación. Como se ve, el núcleo de dislocación en el centro genera el mayor calor y es disipado hacia el exterior desde el centro del núcleo. Un uso futuro de este modelo podría permitir una inclusión para defectos adicionales (dislocaciones, defectos puntuales, y defectos interfaciales) de modo que una temperatura promedio o mayor podría calcularse sobre un área mayor. Esta temperatura de la muestra permite una comparación con resultados térmicos experimentales. Adicionalmente, como la deformación se impone, dislocaciones recién

formadas podrían ser incorporadas en el modelo con alguna distribución de dislocación para cuantificar la adición de nuevas dislocaciones en la respuesta de transferencia calor.

**Figura 3.** Foto instantánea de la respuesta transitoria en el calentamiento del fenómeno Joule como resultado a dislocaciones mayores en el núcleo de la resistencia eléctrica.



**Fuente:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

#### 5.1.4 Efecto viento de electrones

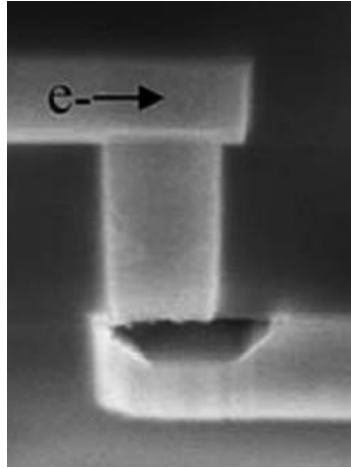
$$E_{wind} = Z^* e \rho_e J N_{core} b \quad (5)$$

Por lo contrario, la energía impartida al núcleo de dislocación desde el viento de electrones donde  $E_{wind}$  es la energía del viento de electrones impartido al núcleo de electrones,  $Z^*$  es el número de carga efectivo de un electrón,  $N_{core}$  es el número de átomos equivalentes por núcleo dislocado, y  $b$  es una distancia atómica [29]. Es sugerido que la transferencia de impulso del campo eléctrico asiste directamente el movimiento de dislocación dentro del metal enrejado. Este modelo es evaluado mediante el registro de energía adicionada al núcleo de dislocación como resultado del impulso transferido. Usando los valores de la Tabla 3.1, la energía total impartida en un átomo individual de una densidad presente de  $100 \text{ A/mm}^2$  es  $1.842 \times 10^{-8} \text{ eV}$ . Esto equivale a  $1,29 \times 10^{-3} \text{ eV}$  por núcleo dislocado. Este resultado es significativamente menor que el calculado debido al calentamiento de Joule en el núcleo de dislocaciones (225 millones de veces menor). En general, se concluye que este efecto no es substancial en adicionar movimiento de dislocación dentro del enrejado metálico. Cabe señalar que la fuerza del viento de electrón o electromigración se ha visto interconexiones de semiconductores y circuitos eléctricos integrados. Sin embargo, esto implica mayores densidades presentes ( $\sim 1,000 \text{ A/mm}^2$ ) y solamente núcleos de iones individuales se desplazan con el tiempo de tal manera forma huecos o vacíos en el circuito [29]. La formación de huecos en ese momento abre el circuito el cual causa que la



interconexión falle. Una interconexión fallida es mostrada en la Figura 4 donde el crecimiento de huecos y estrés causa una falla de interconexión.

**Figura 4.** Interconexión fallida por electro migración



**Fuente** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

Por lo tanto, a partir de análisis anterior, se puede concluir que la mayor contribución hacia los efectos eléctricos observados se hace para localizar áreas de incremento de energía vibracional de la dispersión de electrones (i.e., calentamiento de Joule) y no un efecto directo de momento en los núcleos de dislocación propios por EAF. Por lo tanto, el concepto de áreas localizadas de mayor energía de vibración es discutida a continuación para la interacción de estos “puntos calientes” y dislocaciones con y sin deformación siendo impuesta en el material. Esta teoría propuesta es diferente en que solo atribuye el efecto observado (reducción del estrés y mejorar la conformabilidad) para un fenómeno único y que la teoría es descrita desde un punto científico de los materiales.

#### **5.1.5 explicación de la teoría electro plástica compresiva**

En la siguiente sección, la teoría de electroplasticidad es explicada a partir de un punto de vista científico de tal manera que una sola contribución física se explica que es debido al calentamiento de Joule. Los efectos observados en una corriente aplicada en las propiedades mecánicas de un material. La influencia de la corriente se aplica en el material sin ninguna deformación, durante la deformación, y la influencia presente en la presentación de la formabilidad del material.

#### **5.1.6 Corriente eléctrica sin deformación del metal**

Cuando un metal es estacionario (i.e., ninguna deformación siendo impuesta) y una corriente eléctrica es aplicada, el calentamiento de Joule ocurre cuando son creadas regiones de mayores vibraciones atómicas (i.e., temperaturas) alrededor de los defectos

dentro del material comparado con regiones libres de defecto. Estas áreas con mayor temperatura se pueden llamar “puntos calientes” dentro del enrejado del material. Por lo tanto, teóricamente que los “puntos calientes” permite una rápida disminución en energía almacenada del material, facilitando aniquilación de dislocación. El movimiento para reducir el número de dislocaciones es un resultado directo de difusión atómica mejorada dado a “puntos calientes”. Este método de reducción de estrés residual por remoción de dislocaciones es esperado que sea más rápido que el alivio de esfuerzos convencionales usando un horno. Esto es debido a la diferencia en el calentamiento por convección y calentamiento local con un campo de corriente eléctrica. El aumento de calentamiento por convección requiere una entrada de energía que requiere calentar todo el material para permitir que las dislocaciones se difundan a un sumidero (e.g., límite de grano), mientras que la corriente eléctrica proporciona una mayor cantidad de energía directa de dislocación probablemente de una manera más rápida. Como resultado de la eliminación de las tensiones residuales y la aniquilación de dislocaciones, se espera que la resistencia a la fluencia disminuya. La fuerza de rendimiento es clásicamente relacionada con el tamaño de grano por la relación de Hall-Petch, según la fórmula (6):

$$\sigma = \sigma_o + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Donde  $\sigma$  es la fuerza de rendimiento,  $\sigma_o$  es el esfuerzo friccional (i.e., equivalente al esfuerzo de fluencia de policristal de grano muy grueso),  $k$  es una constante que se puede considerar como una fuente de intensidad de las dislocaciones, y  $d$  es el tamaño de grano mediano [30]. Asumiendo que la dislocación se mueve con un promedio  $\bar{x}$  por unidad de tensión, luego

$$\bar{x} = \beta d \quad (7)$$

donde  $\beta$  es una fracción del tamaño de grano ( $\beta < 1$ ). Después, la tensión se puede decir

$$\varepsilon = \rho \vec{b} \bar{x} \quad (8)$$

que  $\rho$  es la densidad de dislocación y  $\vec{b}$  es el vector Burger. Por lo tanto, la densidad de dislocación es

$$\rho = \frac{\varepsilon}{\vec{b} \bar{x}} = \frac{\varepsilon}{\vec{b} \beta d} \quad (9)$$

la relación de la densidad de dislocación a la fuerza se deriva por Kocks [31] como

$$\sigma = \sigma_o + \alpha G \vec{b} \rho^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$\alpha$  es constante y  $G$  es el módulo de corte. Tras la sustitución de la Eq. (9) en la Eq. (10), este producto

$$\sigma = \sigma_o + \alpha G \vec{b} \left( \frac{\varepsilon}{\vec{b} \beta d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

en comparación con Eq. (11) con la ecuación de Hall-Petch [Eq. (6)], se puede ver que la constante  $k$  es equivalente a

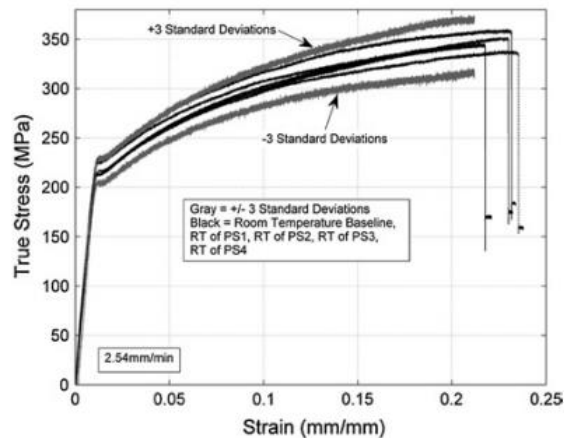
$$k = \alpha G \vec{b} \left( \frac{\epsilon}{\vec{b} \beta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

El cual se muestra la interacción entre el tamaño de grano y la densidad de dislocación.

En resumen, la resistencia del material se puede describir como una función del tamaño de grano o densidad de dislocación, donde un grano más pequeño o una densidad de dislocación más grande proporcionan una mayor resistencia. Como resultado, con una disminución en la densidad de dislocación debido a los “puntos calientes” de la corriente eléctrica, se espera que el límite de elasticidad disminuya. Para mayor información se puede encontrar en el Apéndice B, pero algunos resultados claves se muestran a continuación.

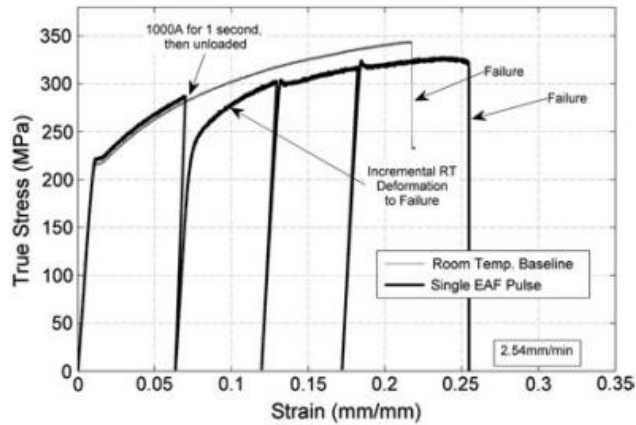
Las pruebas pre-tratamiento eléctricas (Fig. 4) mostraron una variación en su respuesta mecánica sin diferencia en la microestructura en comparación con el material recibido. Esto está de acuerdo ya que no se produjo recristalización a partir del tratamiento eléctrico del material, sin embargo la respuesta mecánica tiene alguna variación. Desde que el material se recibió estaba recocido del procedimiento, se espera que la densidad de dislocación sea bastante baja y no hay trabajo en frío impuesto sobre el material.

**Figura 5.** Resultados del flujo de tensión experimental del comportamiento de temperatura para el ensayo de procedimiento eléctrico estacionario.



**Fuente:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

**Figura 6.** Resultados del flujo de tensión experimental EAF para aplicación de un solo pulso de corriente eléctrica durante la conformación incremental.

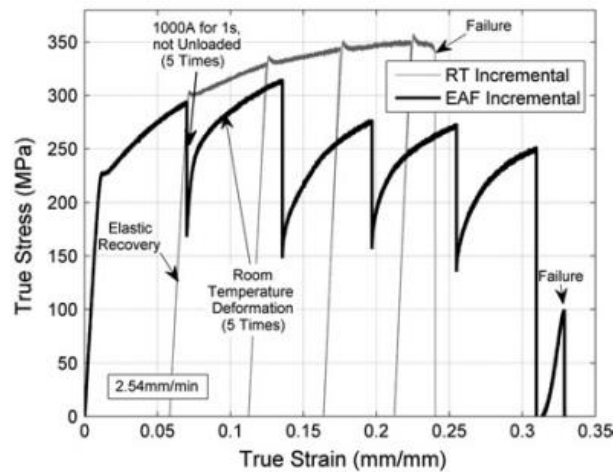


**Fuente:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

Por lo tanto, la baja cantidad de deformación de enrejado junto con los “puntos calientes” en dislocaciones que no tenían la suficiente cantidad de energía para dirigir una gran cantidad de dislocaciones para descender. Como resultado, este fue visto por el límite elástico del material el cual no se ve afectado de manera significativa por el pre-tratamiento eléctrico; sin embargo, se observó algunas diferencias una vez que comenzó el movimiento de dislocaciones.

Además, las pruebas incrementales EAF también están de acuerdo con este efecto. Como se muestra en las Figs. 5 y 6, la aplicación de corriente tuvo un efecto significativo sobre el límite de elasticidad del material sin afectar la microestructura. Esto se alinea directamente con la teoría de “puntos calientes” que permiten la aniquilación de las dislocaciones como resultado directo de difusión mejorada que rodea la dislocación. Esto está en contraste con el pre-tratado eléctrico donde hubo un pequeño efecto en el límite de elasticidad del material. Para las pruebas incrementales EAF, había una fuerza mucho mayor para la aniquilación de dislocaciones dado por la cantidad aumentada de esfuerzo presente en el enrejado. Así, una mayor cantidad de dislocaciones se retiraron y el estrés del material es lo que equivale a la reducción del límite de elasticidad.

**Figura 7.** Resultados experimentales del flujo de estrés comparando conformación incremental RT y EAF



**FUENTE:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

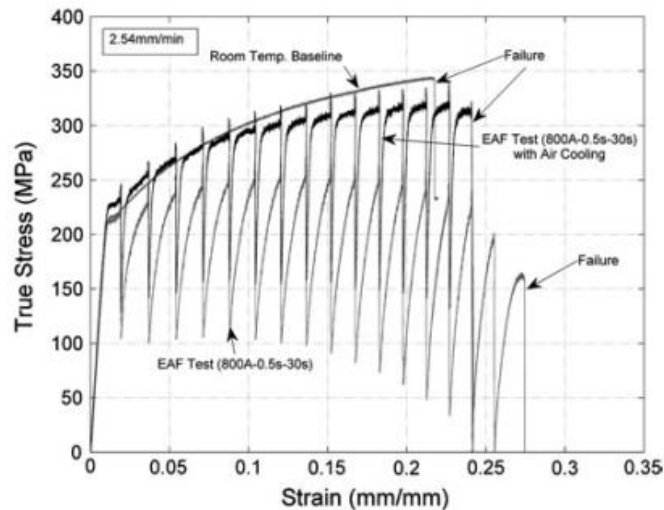
### 5.1.7 Corriente eléctrica con deformación eléctrica

Una teoría similar se presenta para la aplicación de una corriente eléctrica durante la deformación de un metal. A medida que se aplica la corriente durante la deformación, el “punto caliente” creados a partir de una mayor dispersión de electrones en los defectos, mejorando significativamente la energía vibracional en las áreas adyacentes de la dislocación. Esta mayor cantidad de energía que rodea la dislocación permite una mayor movilidad a lo largo del plano de deslizamiento como puede desplazarse por obstáculos del enrejado con menos resistencia. Por lo tanto, la dislocación tiene una mayor calidad de energía y puede moverse bajo una tensión más baja requerida (i.e., la fuerza exterior requerida para la deformación se reduce). El menor estrés requerido es observado en una macroescala cuando es usado el formado aplicando una corriente eléctrica. También, para los otros defectos dentro del material (punto y defectos interfaciales), que tienen una energía vibracional incrementada alrededor de ellos como resultado de una cantidad mayor de dispersión de electrones. Como resultado, si las dislocaciones interactúan o se vuelven a amontonarse para estos defectos, esta energía adicional de esparcimiento puede permitir que las dislocaciones pasen el obstáculo, donde se han fijado de otro modo que permanecen fijas.

Aparte de los “puntos calientes” en las dislocaciones y defectos, el entorno de enrejado de libre-defecto y la temperatura de los materiales va en aumento. Este aumento global de temperatura se traduce en efectos de la temperatura en deformación del material (i.e., ablandamiento térmico).

Se observó que la reducción de la resistencia del material en el ajuste del movimiento de ensayo EAF donde la tensión del material es reducido significativamente durante la aplicación de la corriente. De la teoría, se propone que el principal efecto es el resultado de “puntos calientes” que aumentan significativamente la movilidad de las dislocaciones. Además, algunas aniquilaciones de dislocaciones pueden ocurrir durante el tiempo en el cual la corriente es aplicada.

**Figura 8.** Resultados experimentales EAF de flujo de tensión y efectos de espécimen de enfriamiento durante EAF.



**FUENTE:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

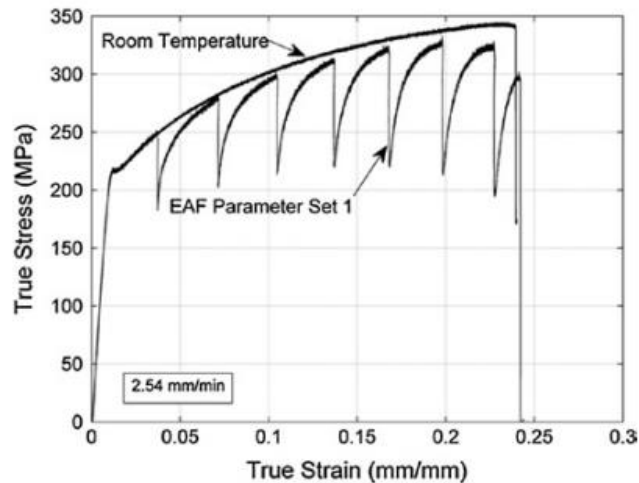
Además, algunas dislocaciones aniquiladas pueden ocurrir durante el tiempo de aplicación de la corriente. A partir del análisis de microestructura que se presenta, se observó que las pruebas EAF tenían cantidad reducida de emparejamiento. Esto puede ser a partir de la corriente aplicada proporcionando exceso de energía a la dislocación o dislocación enclavada tanto así que pueden dejar de continuar el proceso. Como resultado, esto reduce la necesidad de la formación de doble límite, donde fue necesario para el ensayo de deformación de temperatura ambiente continuara. Por lo tanto, la aplicación actual suministra energía directamente a las regiones de alta tensión o las áreas con muy altas densidades de dislocación. Además, para las pruebas en las que se refrigeran se compara con las no refrigeradas (Fig. 7), una pequeña diferencia en la reducción de flujo de tensión es observada mientras el ensayo enfriado es rápidamente aumentado en la resistencia después de la aplicación de la corriente. Esto está de acuerdo con los “puntos calientes” mejorando la movilidad de las dislocaciones, mientras que el resto del material no está a una temperatura no muy elevada. Una vez que la corriente se interrumpe, la energía eléctrica impartida a las dislocaciones es retirada y la fuerza rápidamente aumento como se muestra experimentalmente (e.g., 8).

Por otra parte, esta teoría es también está de acuerdo con la de Ross et al. donde los ensayos isotérmicos se realizaron a temperaturas mayores que la alcanzadas a las pruebas eléctricas [32]. Los resultados de este trabajo mostraron que el ensayo isotérmico no creó flujo de tensión cercano a las reducciones o el aumento de la tensión de fractura comparado con los ensayos eléctricos. Los resultados se dan en la Fig. 9.

Este trabajo se dirige directamente a la ya mencionada diferencia entre calentamiento por convección externa y una corriente eléctrica directa, donde la convección no permite a “puntos calientes” dentro del enrejado. Además, trabajos anticipados en EAF usando pulsos

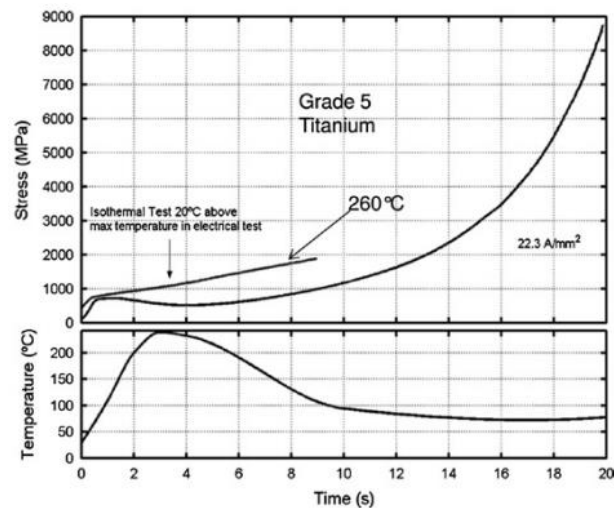
de muy corta duración produciendo grandes reducciones de tensión con mucho menor aumento de la temperatura [33,34]. Por lo tanto, este trabajo también coincide con la teoría en la que el pulso de corta duración permita para altas temperaturas locales en los defectos, mientras el aumento del enrejado se mantuvo a una temperatura reducida.

**Figura 9.** Resultados experimentales EAF de flujo de tensión (Parámetros set 1).



**FUENTE:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

**Figura 10.** Ensayos de titanio Grado 5 isotérmico vs EAF

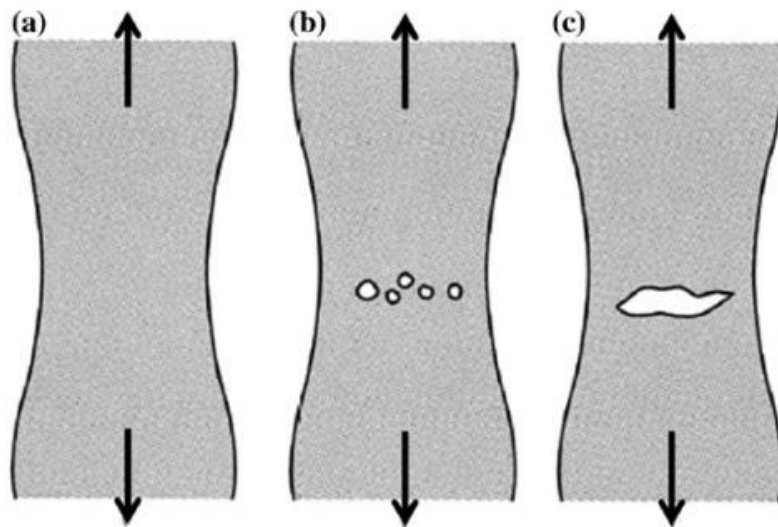


**FUENTE:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

### 5.1.8 Efectos de la corriente eléctrica en la conformabilidad

Con respecto a la capacidad de conformación del material, la fractura dúctil es generalmente transgranular tal que la falla ocurre a través de los granos. Fractura dúctil comienza por la nucleación, el crecimiento, y coalescencia de los micro-huecos. Los micro-huecos se forman cuando una alta reparación se induce en el material en los límites de grano o en pequeñas partículas con impurezas. A medida que la tensión local aumenta, los micro-huecos aumentan y unirse en huecos mayores. Con el tiempo, las grietas inician con los huecos y las grietas crecen hasta que el material finalmente se fractura.

**Figura 11.** Etapas de fracturas dúctiles. A. Región inicial de cuello. B. Formación de Micro-huecos. C. Coalescencia de mayores huecos.



**FUENTE:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

Las altas tensiones dentro del material causan que micro-huecos se formen dónde pueden ser resultados de dislocaciones dentro del enrejado. Como resultado de la corriente aplicada suministrando energía a las dislocaciones, la energía añadida puede permitir enclavar o poner dislocaciones para poner en movimiento de nuevo. Por consiguiente, esto reduce la tensión local dentro del enrejado del material y retrasa el proceso de formación de huecos y fractura. Esta habilidad teorizada de la corriente eléctrica para suministrar energía suficiente energía para permitir dislocaciones enclavadas para que sean móviles pueden explicar los efectos observados en pruebas experimentales [35,36].

### 5.1.9 Soportando resultados experimentales

Ha habido varios trabajos experimentales realizados, que apoyan la nueva teoría de electroplasticidad. En concreto, las conclusiones experimentales discutirán los efectos de calentamiento de la electricidad aplicada y se dirigirá el aumento del nivel atómico generado de vibraciones por el aumento de la temperatura en el enrejado "puntos calientes".

*Calentamiento y vibraciones a nivel-atómico:*



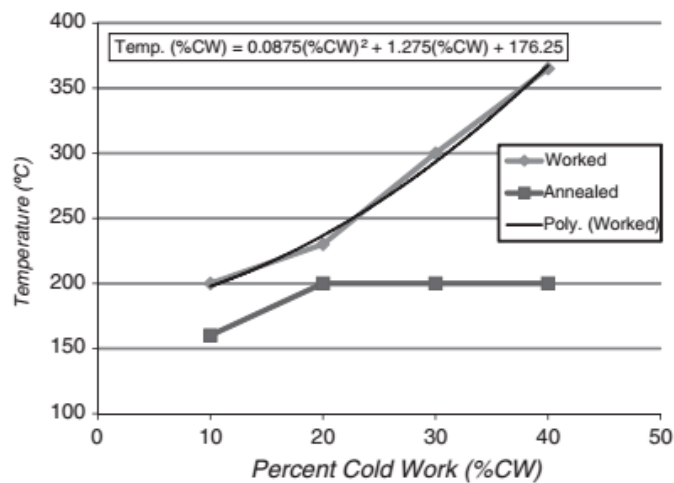
- Limite vs relación de resistividad. [37]
- Densidad de dislocación vs relación de temperatura (pruebas estacionaria-eléctricas). [23]
- Eliminación de resorte en la flexión de la lámina. [38]
- Densidad de dislocación vs EEC (Ensayos EAF). [23]

El trabajo experimental apoya la teoría localizada del calentamiento resistivo localizado debido a la electricidad aplicada. A partir de este trabajo anterior, un valor límite de densidad de corriente se ha vuelto evidente donde es específico para cada metal probado [37]. Este valor límite es el valor de densidad de corriente (para una combinación de velocidad del metal/deformación específica) con lo que se observan mejoras significativas en la formabilidad, por el límite de flujo o el aumento en la elongación alcanzable en comparación con las pruebas convencionales. Tras una investigación adicional, a medida que aumenta la resistividad del metal, el límite de corriente de densidad, donde se producen mayores efectos de conformabilidad, es disminuida (Fig. 7). Esto apoya la teoría la teoría del calentamiento resistivo. Los metales con mayor resistividad tienen un mayor número de obstáculos del enrejado, y hay más sitios para el flujo de electrones para dispersarse. El aumento del número de sitios del calentamiento de enrejado permite un desplazamiento más fácil de la dislocación a través del enrejado.

Otro trabajo examino los perfiles térmicos de las pruebas eléctrico-estacionarias de muestras con diferentes trabajos en frío en ellos (hasta el 50 %) [23]. En estas muestras, como el porcentaje de frío incremento, la densidad de dislocación dentro del metal se incrementó. Después de una corriente constante que se aplicó a cada una de las muestras, el valor de la temperatura máxima aumento en un 85% como su nivel de trabajo en frío incremento de 10 a 40% CW. Eso se puede ver en la Fig. 11. Además, el potencial de voltaje a través de la matriz superior e inferior son mayores cuando se comparó una muestra trabajada con una muestra recocida de las mismas dimensiones a diferentes niveles de %CW. Esto indicaba que la resistencia era mayor en la muestra trabajada.

Una nota interesante es que aunque la densidad de dislocación (número de dislocaciones) fue la única variable que cambio con el trabajo en frío, y las dislocaciones son el único defecto movable del enrejado, la temperatura de la muestra durante un ensayo eléctrico-estacionario aumenta significativamente con el trabajo en frío, y la pieza no se deforma debido a las fuerzas de los electrones. Al considerar la deformación sin ayuda eléctrica, las dislocaciones reciben la incentivación para moverse debido a una tensión ejercida sobre ellos por la fuerza externa adquirida. Esto demuestra que la energía extra impartida en las dislocaciones de los electrones que fluyen es menor en magnitud que la tensión mecánica.

**Figura 12.** Temperatura vs porcentaje de trabajo en frío en relación para SS304. Las temperaturas de ensayo eléctrico-estacionarias con la misma densidad de corriente aumentaron a medida que se incrementa el porcentaje inicial de trabajo en frío.



**FUENTE:** Formación Asistida Eléctricamente (control y medida) [41]

Además, esta energía de los electrones no solo puede causar movimiento de dislocación o deformación plástica, pero raramente actúa como suplemento a las tensiones mecánicas sobre las dislocaciones. Cuando la electricidad es aplicada así misma sin estar acoplada con la deformación, la energía desde los electrones hacia las dislocaciones ayudara en el descanso de tensión rompiendo y reformando enlaces en el área inmediata rodeando las dislocaciones. Este efecto es similar a un proceso de recocido, donde se añade calor a un material para ayudar a romper y reformar límites para reducir sus estados energéticos. Esto dará como resultado un descanso elástico, o reducción de retroceso. El trabajo de Green et al [38] demostró que un corto, sencillo pulso de electricidad fue capaz de eliminar la elasticidad reducida en muestras que ya formado alrededor de un die. Los electrones fueron capaces de reforma los enlaces para eliminar la tensión en la frontera por encima del eje neutro y eliminar la compresión en la frontera por debajo del eje neutro.

A medida que impactan las dislocaciones, aumentan la energía (i.e., aumenta la temperatura) alrededor de las dislocaciones y esto puede proporcionar la energía necesaria para ayudar a las dislocaciones pasar los obstáculos del enrejado que los están reteniendo. Kravchenko [26], en su explicación de la electroplasticidad, indico este efecto cuando el explico que, si hay una corriente eléctrica fluyendo, la energía de los electrones se transfiere a las dislocaciones, haciendo así el flujo plástico sea más fácil.

Porcentaje de trabajo de investigación en frio muestra que la cantidad de dislocaciones preexistentes dentro del incremento del enrejado metálico (a través del trabajo en frio), la eficiencia de la potencia eléctrica aplicada aumenta [23]. Esto se debe a que el mayor número de dislocaciones dentro del enrejado permite a los electrones aplicados impactarlos y provocar regiones de calentamiento localizado. El aumento de las temperaturas de estas regiones también aumenta la energía de los átomos en estas regiones, permitiendo así que el movimiento de dislocación ocurra mucho más fácilmente que a temperaturas más bajas.

## 5.2 TEORIA DE CORTE DE LOS METALES

En la industria se utiliza los procesos de manufactura y de metales donde existen diversos procesos para la fabricación de elementos, por medio de arranque de viruta (mecanizado). En este proceso se hace por medio de una herramienta de corte para el desprendimiento de la viruta y así llegar a la pieza deseada o diseñada.

Mediante este método de conformado se encontrarán algunas ventajas y desventajas:

Algunas ventajas por arranque de viruta:

- Amplia gama de materiales de trabajo
- Variedad de formas y características geométricas.
- Poca variedad de herramientas.
- Precisión dimensional.
- No hay afectación de las propiedades mecánicas del material a trabajar.
- Acabados superficiales de calidad.

Algunas desventajas por medio de arranque de viruta:

- Tanto el tamaño de la pieza a fabricar por caracterizas de la máquina, como la cantidad a fabricar.
- Su consumo energético.
- Altos tiempos de fabricación.
- Desperdicio de material
- Consumo de tiempo.

Ya que en el proceso de arranque por viruta se trabaja en dos planos (bidimensional), el movimiento lo da la herramienta de corte ya que solo tiene movimientos en el eje X (Transversal) y el eje Z (Longitudinal); por medio del giro del material es suficiente para generar o fabricar la pieza deseada.

En la fabricación de alguna pieza deseada se necesitan por lo menos dos movimientos relativos siendo uno de ellas el movimiento primario o movimiento de corte el cual lo entrega la herramienta de corte y el otro movimiento para la generación de piezas es el movimiento de giro (Rotación) del material. Otro tipo de movimientos que tienen este tipo de máquinas es el movimiento de avance el cual esta combinado con el movimiento de giro, el cual por cada giro avanza cierta cantidad menor de movimiento.

Tanto los movimientos de rotación o lineales los puede llevar la herramienta de corte como también la pieza a trabajar, y así se tiene una variedad de máquinas para el conformado de superficies con el proceso de arranque de viruta. En la tabla se muestran las diferentes máquinas que se usa el proceso por arranque de viruta.

**Tabla 2.** Generación de Superficies. Máquinas de arranque de viruta.

MÁQUINA	MOVIMIENTO	MOVIMIENTO DE TRABAJO	PORTADOR
<b>Limadora</b>	Mov. de Corte	Lineal	Herramienta
	Mov. de Avance	Lineal	Pieza
<b>Cepilladora</b>	Mov. de Corte	Lineal	Pieza
	Mov. de Avance	Lineal	Herramienta
<b>Torno</b>	Mov. de Corte	Circular	Pieza
	Mov. de Avance	Lineal	Herramienta
<b>Fresadora</b>	Mov. de Corte	Circular	Herramienta
	Mov. de Avance	Lineal	Pieza
<b>Taladrar</b>	Mov. de Corte	Circular	Herramienta
	Mov. de Avance	Lineal	Herramienta

**FUENTE:** Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos

En las máquinas mencionadas anteriormente se debe tener presente los siguientes temas: la formación de viruta, geometría de corte, influencia de los ángulos de corte, fuerzas de corte, energía específica de corte, fuerzas de fricción, temperatura y descaste. El cual se mencionará a continuación.

### 5.2.1 formación de viruta

Para el estudio realizado el equipo y herramienta a usar serán: Torno Revolver como máquina y Acero rápido HSS para la herramienta de corte.

La herramienta de corte a usar forma un ángulo diedro (figura formada por dos planos que se cortan entre sí), el cual nos ayudara a realizar el respectivo análisis de acuerdo a la teoría de corte.

Al mecanizar el material genera desprendiendo la viruta dando una forma deseada, dando así la intersección de los planos diedro en una recta, formando así el filo de la herramienta denotándose con la letra S, las caras del ángulo son:

- Cara de incidencia o flanco de herramienta  $A_x$ , siendo la cara más próxima a mecanizar.
- Cara de desprendimiento  $A_y$ , siendo la cara por donde sale la viruta.

Para conocer la velocidad de corte  $V_c$  la cual se mide en unidades del sistema internacional (SI) hay que tener un desprendimiento de viruta y se genera con un movimiento respecto a la superficie de contacto [ $m/min$ ].

Para tener un mejor entendimiento acerca de fabricación por medio de arranque de viruta se deben tener los siguientes conceptos:

- Avance: Movimiento longitudinal adicional al movimiento de corte, para la remoción de material. Representado por unidades de mediada de la siguiente forma: [ $mm/s$ ,  $mm/rev$ ]
- Espesor de viruta sin deformar  $a_c$ : Espesor que se desea remover antes que sea sometido a deformación.
- Espesor de viruta deformado  $a_o$ : Material removido después de deformación sufrida por el corte.
- Factor de recalcado o relación de corte  $r_c$ : Relación entre espesor de viruta sin deformar y espesor de viruta deformada. Es mayor o igual a uno (1).
- Ancho de viruta  $a_w$ : Ancho de material removido, se mide en dirección al filo.
- Área de corte  $a_c$ : Área perpendicular a la velocidad de corte barrida por la herramienta de corte.
- Área de avance  $a_f$ : Área perpendicular a la velocidad de avance barrida por la herramienta de corte.
- Tasa de remoción de material  $z_w$ : Cantidad de material removido por unidad de tiempo.

A la hora de mecanizar piezas con arranque de viruta se forman tres (3) tipos de virutas dependiendo de los parámetros de corte y ángulos de la herramienta que se elijan:

- Viruta discontinua: Este tipo de viruta es generada cuando se mecanizan materiales frágiles y dúctiles con velocidades bajas de corte en la remoción de material.
- Viruta con protuberancias o corte con recrecimiento de filo: Se presenta en materiales demasiado dúctiles mecanizados con bajas velocidades de corte, se presenta por la fricción generada entre la herramienta de corte y la viruta removida; la viruta se adhiere a la herramienta utilizada para el corte material formado un exceso de material en el filo.
- Viruta continua: Se presenta con la remoción de material a altas velocidades de corte, grandes ángulos de ataque entre  $10^\circ$  -  $30^\circ$  y poca fricción entre la viruta y la cara de la herramienta de corte.

### 5.2.2 Geometría de corte

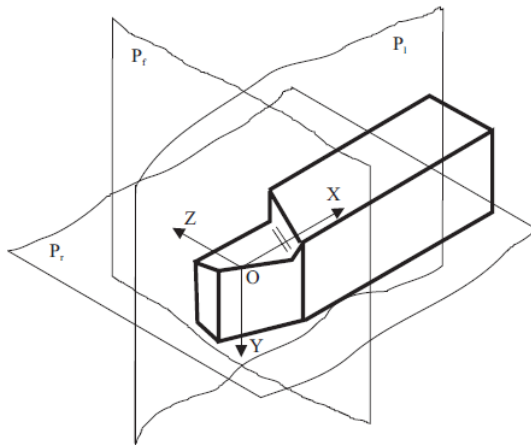
Mediante el estudio de este proyecto se denotará a la herramienta de estudio como monocortante.

Para cada herramienta de corte de tipo monocortante, está determinada por los ejes cartesianos, donde el eje OX representa la sujeción de la herramienta, el eje OY es la velocidad de corte, la OZ representa en el formado.

En los planos formados por ellos y sus nomenclaturas se relacionan por el sistema cartesiano ya definido, donde:

- Plano Longitudinal  $P_l$ : Plano perpendicular a los otros planos que serán mencionados. La  $V_c$  coincide con el eje OY, donde en este plano esta la velocidad de corte y perpendicular el avance de la herramienta.
- Plano de Trabajo  $P_f$ : Plano formado por OY y el avance, en la operación de cilindrado se entiende que trabaja en el plano YOZ y la parte del movimiento que genera el refrentado es el plano YOX.
- Plano de Referencia  $P_r$ : Es el plano que representa el sistema XOZ y es el plano perpendicular a la velocidad de corte.

**Figura 13.** Orientación de los ejes y los planos designados del sistema cartesiano.



**FUENTE:** Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos

Donde se muestra el sistema cartesiano y sus ejes de orientación. Para la geometría de la herramienta de corte, se encuentran otros planos los cuales son llamados planos de situación adicionalmente a los ya mencionados anteriormente.

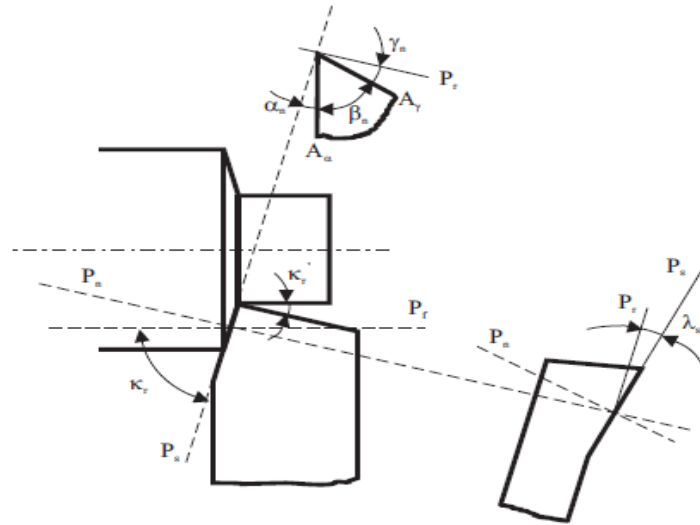
- Cara de Desprendimiento  $A_y$ : Sección de la herramienta donde se desliza el material situado arriba del plano del filo.
- Cara de Incidencia  $A_\alpha$ : Sección más cercana al filo de la herramienta.
- Plano Normal  $P_n$ : Plano normal al filo S.
- Plano de Filo  $P_s$ : Donde está conformado este plano que es perpendicular al plano de referencia  $P_r$  y está dado por el filo S y velocidad de corte  $V_c$ .

Ya con los planos de corte definidos, proseguimos con los ángulos de corte de la herramienta:

- Angulo de Desprendimiento  $\gamma_n$ : Angulo formado por la cara de desprendimiento  $A_y$  y el plano  $P_r$ .
- Angulo de Incidencia  $\alpha_n$ : Está formado por la cara de incidencia  $A_\alpha$  y el plano  $P_s$ .

- Angulo de Filo  $\beta_n$ : Está formado por la cara  $A_\gamma$  y la cara  $A_\alpha$ .

**Figura 14.** Sistema cartesiano con los ángulos definidos para la operación de cilindrado.



**FUENTE:** Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos

### 5.2.3 Fuerzas de corte

En las máquinas siempre se generaran gastos de fabricación por la cual pueden ser elevados ya que tienen una potencia consumida, para ello se necesita saber cuánto fue la potencia consumida en un proceso de mecanizado. En este proceso es posible calcular la potencia consumida generada por la máquina. Otro factor importante en el que las fuerzas de corte están presentes, en el fenómeno de calentamiento de la pieza y la herramienta de corte, desgaste de la herramienta, acabado superficial de la pieza, entre otros.

Al tener contacto la herramienta de corte con la pieza se genera un sistema de presiones en el cual habrá una resultante llamada  $F$  donde la resultante de esta fuerza es despreciable ya que su área es muy pequeña.

En el sistema de fuerzas realizando una descomposición en los planos cartesianos la dirección de la velocidad de corte se tomará como la fuerza de corte  $F_c$ , siendo la variable que consume potencia en un proceso de mecanizado y la dirección perpendicular a la velocidad de corte se tomara como la fuerza de empuje  $F_t$ , cumpliendo la función de mantener la posición del filo de la herramienta de corte en el plano.

### 5.2.4 Energía específica de corte

Es designada como  $p_s$  en la cual es la energía que usa para remover cierta cantidad de material, donde la energía específica está relacionada con la potencia de la máquina  $P_m$  y el material removido  $Z_w$ , según la fórmula (13)

$$p_s = \frac{E_m}{V} = \frac{E_m/t}{V/t} = \frac{P_m}{Z_w} \quad (13)$$

Otra manera de relacionar la energía específica de corte es con la relación de la fuerza de corte y el área de corte, por lo anterior también se puede llamar fuerza específica de corte

$$p_s = \frac{P_m}{Z_w} = \frac{K_s \cdot F_c \cdot v}{A_c \cdot v} = \frac{F_c}{A_c} \quad (14)$$

### 54.2.5 Fuerzas de fricción

En las operaciones de mecanizado las fricciones generadas al momento de uso son diferentes a los fenómenos de fricción normales, por esta razón a continuación se nombrarán los diferentes tipos de deslizamiento entre superficies metálicas.

- **Contacto con Microsoldaduras:** Cuando dos superficies metálicas rugosas entran en contacto las capa de óxido de ellas es eliminadas por la fricción producida, la presión normal es algo elevada, cuando se presenta este fenómeno hay una unión metálica interatómica, forman picos en las superficies elevando el área real de contacto  $A_r$ , que es menor al área aparente de contacto  $A_a$ . Para que haya deslizamiento entre las superficies se cizallan las microsoldaduras las cuales tienen una tensión de resistencia a la cizalladura  $\tau_{sl}$ , siendo la fuerza de rozamiento total:

$$F_R = \sum_i A_i \cdot \tau_{sl} = A_r \cdot \tau_{sl} \quad (15)$$

Por otra parte, en superficies con diferentes alturas debido a la rugosidad formando distribuciones gaussianas y para cargas ligeras, el área real de contacto  $A_r$  es proporcional a la presión normal aplicada, que en un área determinada será la fuerza normal  $F_N$ , por lo tanto se tiene que:

$$A_r \cdot C \cdot F_N \quad (16)$$

$$F_R \cdot \tau_{sl} \cdot A_r = \tau_{sl} \cdot C \cdot F_N = \mu \cdot F_N \quad (17)$$

Cumpliendo la ley de la fricción de Coulomb de proporcionalidad entre la fuerza de fricción  $F_R$  y la fuerza normal  $F_N$ , siendo  $\mu$  coeficiente de rozamiento.

- **Contacto Débil:** Los materiales metálicos siempre van a tener una capa de óxido con la que protege el material de posibles afectaciones por presencia de la corrosión. Las tensiones de cizallamiento en las capas de óxido son bajas y si la presión normal es baja, el valor del área de contacta será bajo dando como resultado un coeficiente de fricción bajo.



- **Contacto pleno:** Si las fuerzas de fricción son muy elevadas la proporcionalidad falla hasta que el contacto de las superficies sea pleno, esto quiere decir,  $A_r = A_a$ , convirtiendo la fuerza de fricción constante e independiente de la fuerza o presión aplicada.

Cuando desliza la viruta sobre la cara de desprendimiento, está dejando la superficie libre de óxidos, ya que nueva superficie no ha tenido exposición con el aire para que produzca la capa de óxido.

En este tipo de contacto las presiones normales son demasiadas elevadas por encima del esfuerzo de fluencia de la pieza por lo tanto, el contacto entre superficies será pleno.

### 5.2.6 Temperatura y desgaste

En el mecanizado de piezas se generan muy altas temperaturas en el proceso por arranque de viruta, donde el mecanizado tiene un gran factor importante que influye en este proceso. En el proceso de mecanizado hay algunos inconvenientes, los cuales son; donde la herramienta de corte por medio del contacto genera fricción y aumenta la temperatura causando así el desgaste de ella misma, el cual un calentamiento excesivo puede cambiar las propiedades mecánicas del material, gracias a esto las dimensiones pueden variar con la temperatura por las dilataciones o contracciones.

### 5.2.7 Generación de calor

Donde en el proceso de arranque de viruta la potencia consumida por la máquina se convierte o transforma en calor por diferentes razones:

- Fricción entre viruta y herramienta.
- Fricción entre herramienta y pieza a mecanizar.
- Deformación plástica en la zona de cizalladura de la viruta.

### 5.2.8 Calentamiento de los elementos

El porcentaje de calor producido a la pieza de trabajo se representara por  $\Gamma$ , siendo función del ángulo de cizalladura, según la fórmula (18)

$$R = \frac{p * c * v * A_c}{k} \quad (18)$$

$p$ : Densidad

$c$ : Calor específico

$v$ : Velocidad de corte

$A_c$ : Área de corte

$k$ : Conductividad térmica

$R$ : Número térmico

Donde las variables mencionadas anteriormente son referidas a la pieza que se esté trabajando.

Se tienen relaciones analíticas entre  $\Gamma$  y  $R * \tan \phi$ , demostrando que el calentamiento de la pieza disminuye con el aumento del ángulo de cizalladura, la densidad, el calor específico, el área de corte y disminuyendo la conductividad térmica.

El calor generado por la fricción de la viruta con la herramienta de corte, se origina a lo largo del área de contacto, la temperatura inicial de la viruta es la debida a la deformación plástica, según la fórmula: (19)

$$\theta_s = \frac{F_s * v_s}{p * C * Z_w} \quad (19)$$

La temperatura ira incrementando por la fricción hasta llegar a la temperatura máxima en la cara de desprendimiento. El incremento de la temperatura se puede calcular de la siguiente manera: (20)

$$\Delta\theta_m = \frac{F_r * v_v}{p * C * Z_w} * 1,13 * \sqrt{\frac{R * a_o}{l_f}} \quad (20)$$

La temperatura máxima está limitada por las características de los materiales de las herramientas de corte a altas temperaturas, teniendo cada uno de ellos una temperatura crítica a partir de se presenta un desgaste alto perdiendo el filo de la herramienta.

### 5.2.9 Desgaste de herramientas

En el momento de mecanizar una pieza hay una fricción entre la herramienta de corte y el material a trabajar, donde esta fricción genera un desgaste hasta perder el filo de la herramienta. En este fenómeno se presentan tipos de desgaste:

- **Adhesión:** Debido a las microsoldaduras, los átomos de la superficie de la herramienta son arrastrados por la viruta.
- **Abrasión:** El material que se va a trabajar tiene inclusiones duras que rayan o arañan la superficie de la herramienta.
- **Difusión:** En temperaturas elevadas los átomos de aleaciones se difunden hacia donde existen menos concentraciones, generando debilitación en la herramienta.

Donde en la herramienta existen dos tipos de desgaste:

- En la cara de desprendimiento produce un cráter, normalmente en el punto de la temperatura máxima.
- La cara de incidencia se produce un achaflanamiento de la punta debido al rozamiento de la herramienta de corte con la pieza que se está mecanizando.

### 5.2.10 Fluidos de corte

Los fluidos de corte cumplen con dos funciones, las cuales son:

- **Refrigeración:** Utilizados para disminuir temperaturas generadas en los procesos de mecanizado, permitiendo trabajar a mayores velocidades y avances.
- **Lubricación:** Utilizados para disminuir las fuerzas de fricción entre la herramienta de corte y la viruta, para evitar el recrecimiento del filo.

### 5.3 PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

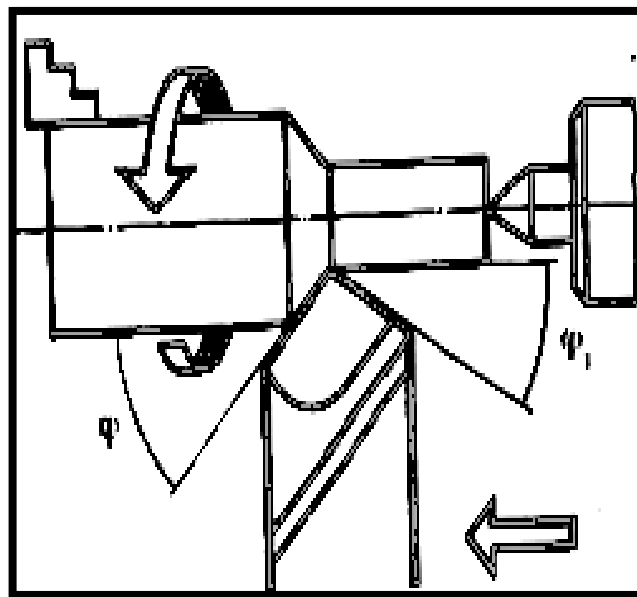
Para la ejecución del presente proyecto se definió una metodología dividida en 7 etapas, las cuales seguidamente serán explicadas de manera resumida.

**Etapas 1.** Definición de las variables de entrada del experimento: material (tipo, Tamaño y forma) a mecanizar, velocidad de rotación, profundidad de corte, Velocidad de avance, ancho de pulsos, frecuencia de pulsos.

**Actividad 1.1:** Realización de un diseño básico de experimento, para definir las variables de entrada del experimento. Este diseño debe prever el montaje real en máquina.

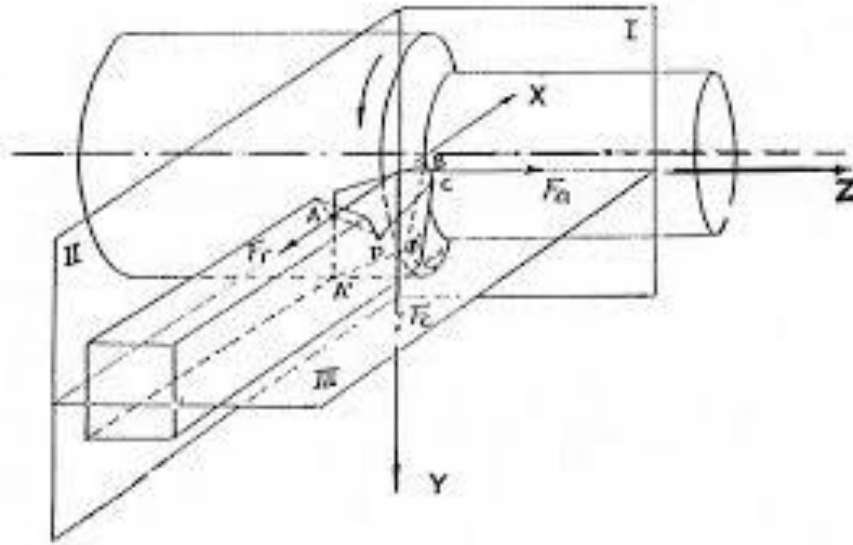
La experimentación está basada en seguir un esquema de montaje como el mostrado en las figuras 1 y 2, el cual corresponde a un *montaje entre copa y punta*.

**Figura 15.** Copa y Punta



**FUENTE:** Mecánica del corte de metales. [40]

**Figura 16.** Caras de Herramienta



**FUENTE:** Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos

Consecuentemente se deben definir:

- Material de la pieza
- Material, forma y montaje de la herramienta a utilizar
- Parámetros de corte: velocidad de rotación de la pieza, velocidad de avance de la herramienta y profundidad de corte.
- Parámetros eléctricos del generador de pulsos

La selección de las variables anteriormente mencionadas, obedeció a cálculos aplicando la teoría clásica del corte de metales, y teniendo en cuenta las disponibilidades en la máquina.

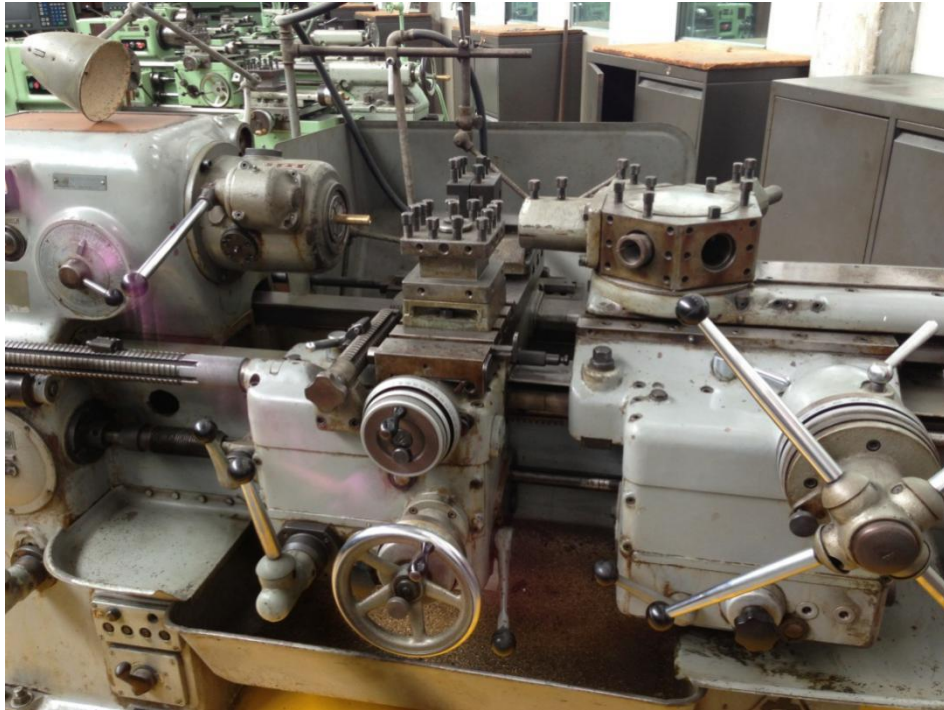
#### **Máquina a utilizar:**

Torno revolver marca ZPS, modelo R5 (**Figura 3**), volteo sobre bancada 400mm. Largo torneable 750mm. Potencia de 7,8kW.

Rango real de velocidades angulares (rpm): 38 / 45 / 57 / 71 / 89 / 114 / 142 / 177 / 227 / 290 / 361 / 460 / 573 / 716 / 914 / 1133 / 1415 / 1803 rpm.

Rango real de velocidades angulares: 0,046 / 0,064 / 0,089 / 0,138 / 0,174 / 0,254 / 0,356 / 0,508 / 0,711 / 1,016 / 1,422 / 2,032 mm/rev

**Figura 17.** Torno revolver ZPS, R5, utilizado en la experimentación



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

**Material de la pieza:**

Se eligió acero AISI/SAE 1045 de  $\phi 1/2"$ . Se trata de un acero al carbono, apto para temple, de mediano contenido de carbono.

Se adoptó este material debido que se trata de un material de amplia utilización en la industria, de fácil consecución en el comercio, ligeramente aleado, y bastante estudiado de acuerdo a diferentes bibliografías consultadas.

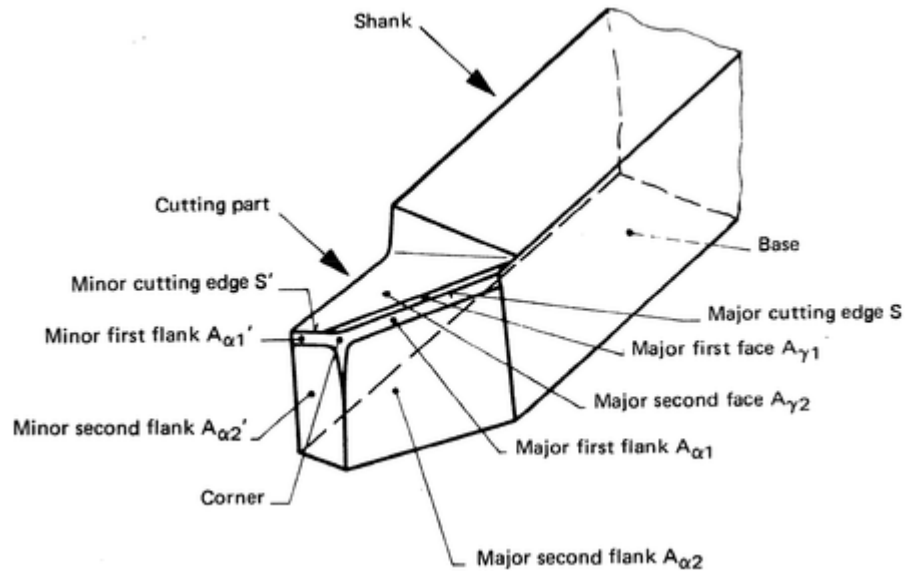
**Herramienta de corte:**

Se utilizaron barras de acero rápido HSS (ASSAB 17). Existen varios tipos de herramientas de corte, donde se enfatizan los monofilos y multifilo. Las monofilo se usan comúnmente para operaciones de torneado, las multifilo se usan para operaciones de fresado y taladrado.

Para la estandarización de estas herramientas hay una norma de la Organización Internacional de Normalización (ISO) que ayudan a seleccionar la herramienta adecuada para cada aplicación, esta es: ISO 3002/1 (Equivalente UNE 16-149). La norma ISO

3002/1[20], ayuda a definir la característica de cada herramienta de acuerdo a su forma, ángulo de incidencia, espesor, entre otros.

**Figura 18.** Codificación Norma ISO 3002/1



**FUENTE:** Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos

En las pruebas del torneado asistido con pulsos de alta densidad de corriente (EPT) se utilizaron dos buriles con propiedades similares uno para el torneado sin EPT y otro torneado asistido con este, como se puede visualizar en la figura 18.

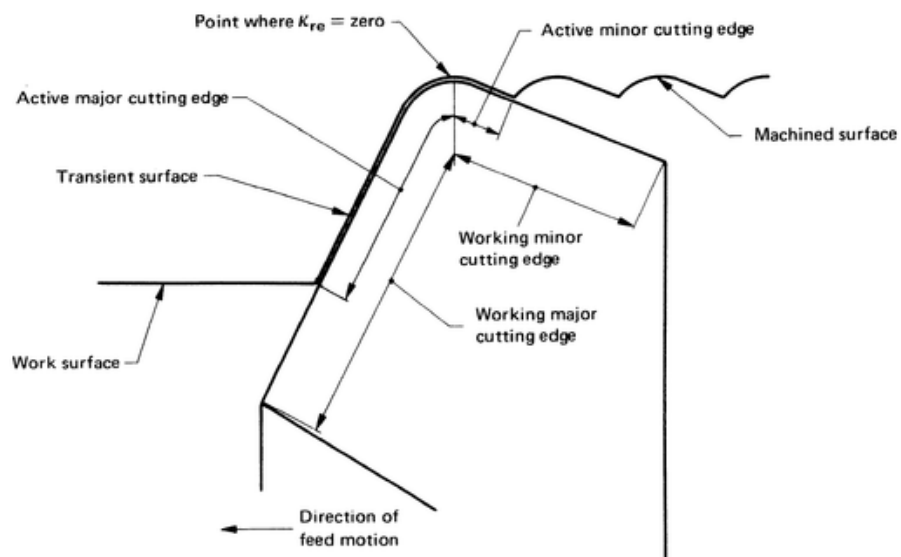
- Hacen referencia a la norma ISO 3002/1. En la figura 19 se puede ver la ilustración de varios términos relacionados con la herramienta y la pieza de trabajo.

**Figura 19.** Buriles utilizados en las pruebas de torneado



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

**Figura 20.** Especificación de la herramienta utilizada.



**FUENTE:** ANSI/ASME B94.55M (1985) [100]

**Figura 21.** Esquema real de montaje para torneado acero rápido HSS.



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

De acuerdo con lo mostrado en la figura 18, los ángulos de la herramienta fueron los siguientes:

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| - Dimensiones:                 | Buriles 5/16" x 5/16" x 2 1/2" HSS.     |
| - Angulo de incidencia         | $\alpha$ : 8°                           |
| - Angulo de posición principal | $\phi$ : 40°                            |
| - Angulo de ataque             | $\gamma$ : 14°                          |
| - Radio de punta               | $r$ : 1,6 mm                            |
| - Composición química          | C = 0,75%, W = 18%, Co = 4% y V = 1,25% |

Ya precisados los parámetros de la herramienta, es necesario hacer lo propio con los parámetros de montaje en máquina. Solo se contaba con un porta-buril recto por lo cual fue necesario afilar el buril HSS (ASSAB 17) a las especificaciones deseadas y así realizar un montaje para reducir los efectos, logrando así minimizar el cambio que este producía en los parámetros obteniendo como resultado una geometría de montaje, como se puede observar en la figura 18.

**Actividad 1.2:** De acuerdo al material seleccionado, se determinarán los parámetros de corte.

**Tabla 3.** Programación para estudio del efecto de EP sobre vida útil de herramientas HSS



Item	Nombre operación	Descripción	Observación	Herramienta	Profundidad de corte (mm)	Diámetro inicial (mm)	Diámetro final (mm)	Velocidad angular	Vc (m/min)	Avance (mm/rev)
1	Cilindrado	Cilindrar sobre una longitud de 75mm	Montaje entre copa y punta	Buril 1	1,00	12,70	10,70	716	28,57	0,138
1A	Medir y registrar vibraciones									
2	Observar y fotografiar el flanco (al menos que sean 20 puntos, en lo posible a intervalos constantes de tiempo) Medir rugosidad del trozo cortado. Tomar decisiones									
3	Desmontar probeta e instalar probeta nueva									
Iterar pasos 1 a 3, hasta que se cumpla el criterio de desgaste de flanco										

**FUENTE:** Felipe Aristizabal C.

### Actividad 1.3: Selección de ancho y frecuencia de pulsos de corriente.

**Figura 22.** Montaje del generador de pulsos. Parte superior: osciloscopio Fluke 123; parte intermedia: generador de pulsos. Parte inferior: transformador de voltaje de alimentación del generador de pulsos.



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

El generador de pulsos corresponde a un equipo como el mostrado en la figura 22. Sus capacidades de trabajo son:

- Frecuencia variable entre (0-400) Hz
- Ancho de pulso variable entre (0-200) us
- Corriente máxima entregada por el equipo: 120A

En búsqueda de obtener la máxima potencia del generador de pulsos, se eligieron:

$F = 300\text{Hz}$  y  $B=200\text{us}$ .

Los resultados de las actividades 1.1, 1.2 y 1.3, han sido resumidos en la tabla 4.

**Tabla 4.** Parámetros de material, corte y pulsos.

VARIABLES DE ENTRADA		
Variable	Valor o selección	Criterio
Material	Acero AISI/SAE 1045 $\phi 1/2"$	Comercial
Velocidad de rotación (rpm)	716	Teoría de corte clásico
Velocidad de avance (mm/rev)	0,138	Teoría de corte clásico
Ancho de pulsos( $\mu$ s)	200	Para máxima potencia de los electropulsos
Frecuencia de pulsos (Hz)	300	Para máxima potencia de los electropulsos

**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

**Etapla 2. Definición de un protocolo de experimentación en cuanto a variables de salida.**

**Actividad 2.1: Definición de las variables de salida a ser medidas, durante y después de la ejecución de la experimentación, teniendo en cuenta su disponibilidad en la Universidad Tecnológica de Pereira.**

Pensando en evaluar el efecto de los pulsos de corriente de alta densidad en el torneado con buril HSS, se eligieron como variables de salida:

- Vibraciones mecánicas axiales y radiales
- Rugosidad superficial de las probetas mecanizadas.
- Altura de desgaste de flanco  $h_f$ .

Las vibraciones mecánicas fueron medidas con un equipo DSP Logger MX 300 (figura 23). Las vibraciones axiales y radiales, fueron medidas en el husillo de la máquina, lo más cerca posible a la acción de la herramienta, tal como se parecía en la figura 24.

**Figura 23.** Equipo DSP Logger MX 300 utilizado.



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

**Figura 24.** Esquema de montaje de los acelerómetros.



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

**Figura 25.** Rugosímetro JS201 P utilizado



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

La rugosidad o acabado superficial fue medida con un Rugosímetro SJ 201 P (figura 25), con las siguientes especificaciones:

- Palpador de diamante, con un radio de  $5\mu\text{m}$  ( $200\mu\text{in}$ ).
- Fuerza de medición de  $4\text{mN}$  ( $0,4\text{gf}$ )
- Campo de medición:  $300\mu\text{m}$  ( $\pm 150\mu\text{m}$ ) o  $1200\mu\text{in}$  ( $\pm 6000\mu\text{in}$ )
- Recorrido del palpador  $21\text{mm}$  ( $0,82\text{in}$ )
- Velocidad de desplazamiento. En medición:  $0,25$  a  $0,5\text{mm/s}$ . Retroceso:  $0,8\text{mm/s}$ .
- Realiza la medición bajo normas JIS, DIN, ISO y ANSI.

Para las mediciones de las variables eléctricas frecuencia, ancho de pulso y forma del pulso, se utilizó un osciloscopio Fluke 123, 20MHz 196C (ver figura 22).

Finalmente, el desgaste de la herramienta  $h_f$  fue medido de manera indirecta, tomando fotografías en la cara de trabajo del buril hss, con una cámara Nikon L830. Posteriormente, a las imágenes tomadas se les hizo un tratamiento con el software draftsight

### **Actividad 2.2: Definición de aplicativos de software a ser empleados en el postprocesamiento de información.**

Los siguientes aplicativos fueron utilizados para el postprocesamiento de la información:

Excel: este software permite elaborar tablas y formatos que incluyan cálculos matemáticos mediante fórmulas; las cuales pueden usar operadores matemáticos además de poder utilizar elementos denominados funciones.

DraftSight: DraftSight es una alternativa a AutoCAD desarrollada por Dassault Systems que ofrece un software multiplataforma y gratuito para visualizar y editar archivos con formato DWG.

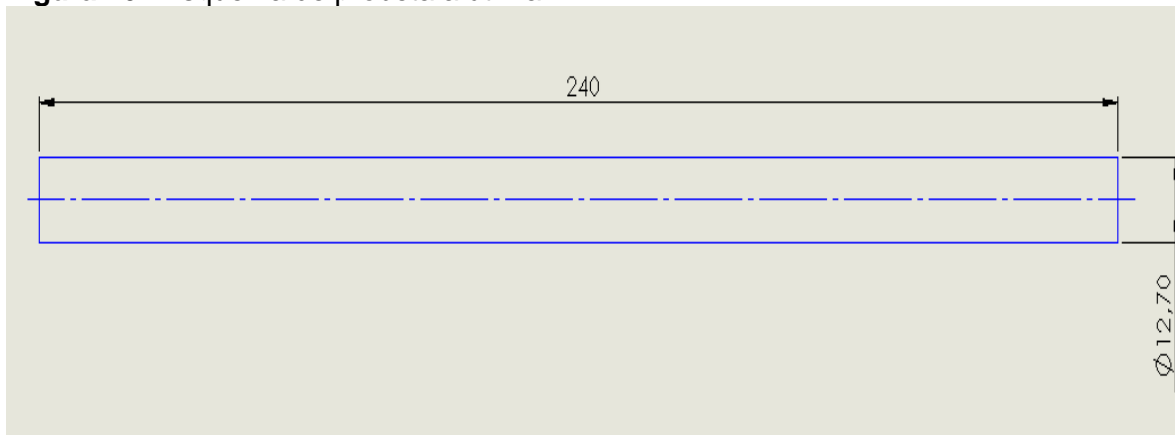
Software del Fluke 123, para visualizar los pulsos entregados por el generador de pulsos.

### **Etapas 3. Preparar probetas e instrumentación necesaria para la experimentación.**

### Actividad 3.1: Definición de forma y tamaño de las probetas. Fabricación de las mismas.

Se utilizaron barras de acero AISI/SAE 1045 con un diámetro de 12,7 mm (1/2 pulgada) que se cortaron con sierra mecánica dejándolas de un tamaño de 242 mm luego de esto se montaron en el torno para realizarles un refrentado en las caras posteriormente se les practicaron los agujeros de centros, para propiciar el montaje entre copa y punta, y garantizar cilindricidad durante el mecanizado longitudinal.

**Figura 26.** Esquema de probeta a utilizar.

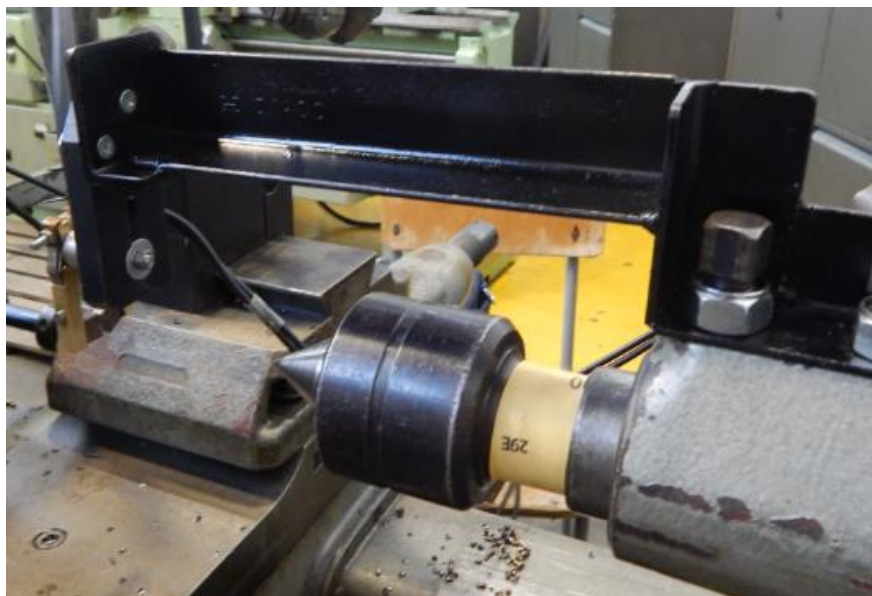


**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

### Actividad 3.2: Fabricación de utillajes necesarios para completar el montaje físico previo en los numerales 1.1 y 2.1.

Soporte metálico (figura 27) para montar el posta-escobillas permitir que recorriera la región de la probeta sin mecanizar, evitando saltos y daños.

**Figura 27.** Montaje estructura porta escobillas


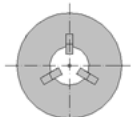


**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

#### **Etap 4. Ejecutar pruebas preliminares.**

#### **Actividad 4.1: Montaje y puesta a punto del equipamiento.**

**Figura 28.** Ruta de trabajo

			UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  FACULTAD DE TECNOLOGÍAS  ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA		HOJA 1	NOMBRE DE LA PIEZA						
					RUTA DE TRABAJO	MATERIAL: Acero AISI/SAE 1045				REFERENCIA:		
						MEDIDAS: ● 1/2" x mm				CANTIDAD:		
COLOCACION	PROCESO	PASOS	MAQUINAS: Torno revolver									
			TRABAJO A REALIZAR	ESQUEMA SIMPLIFICADO	HERRAMIENTAS DE CORTE, INSTRUMENTOS DE MEDIDA Y ACCESORIOS	VALORES DE ORIENTACION DE TRABAJO						
						VEL DE CORTE (mm/min)	N (RPM)	AVANCE (mm/rev)	PROF. DE CORTE (mm)	No. PASADAS	TIEMPO POR PIEZA (min)	
A		1	Preparar la máquina montando la copa de tres mordazas, y alinear el buril al nivel del punto giratorio.		Copa de tres mordazas Butil 5/16 HSS Porta butil Llave para el porta butil Punto giratorio	.	.	.	.	.	.	

**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

#### **Actividad 4.2: Pruebas real de ensayos y correcciones necesarias.**

Para el alistamiento de la máquina se tomaron las medidas necesarios para el buen funcionamiento del experimento como comprobar los niveles de aceite de torno revolver, el montaje y la alineación de las probetas siendo necesario corregir solo algunos detalles

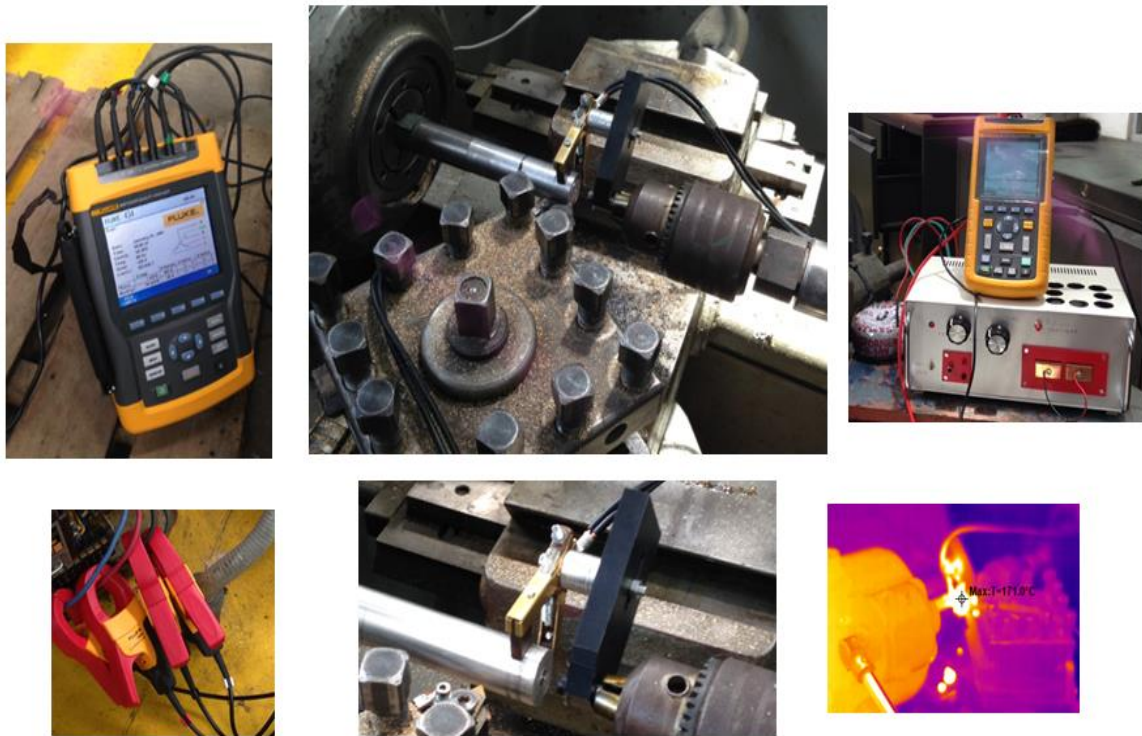




- Porta escobillas
- Porta buril
- Analizador de vibraciones
- Calibrador pie de rey, rango (0-150) mm, y resolución 0,01mm
- Tornillo micrométrico de rango (0-25) mm, y resolución 0,01mm
- Cámara Nikon Coolpix L830
- Software para procesamiento de imágenes, *Draftsight* 2015

Al preparar las herramientas de trabajo se realizaron los ensayos pertinentes para el estudio, primero fueron cortadas gran cantidad de probetas de acero 1045 con ayuda de una sierra mecánica dejando una longitud de 243mm, luego se hizo el alistamiento del torno, montando la copa de tres mordazas y alineando el buril con el punto giratorio, refrentando para eliminar defectos del corte en el material, seguido de la ejecución de agujeros de centros, en cada una de las caras de las probetas.

**Figura 30.** Montaje y conexión de los instrumentos de medida para la experimentación.



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

Después de tener todas las probetas listas se procede a realizar un montaje como el mostrado en la figura 30 instalando y conectando todos los instrumentos de medida y los accesorios necesarios para el realizar el experimento. El generador de pulsos se conecta por una terminal al porta-escobillas (que será el encargado de transmitir la energía a la probeta) y por el otro terminal a la herramienta de corte; tanto la probeta como el porta-herramienta, deben de estar aislados eléctricamente de la máquina, para evitar accidentes debido al paso de la corriente.

Se da inicio al proceso de cilindrado de cada una de las probetas con y sin la asistencia de los pulsos de alta densidad de corriente, simultáneamente se miden y registran vibraciones; una vez culminado el mecanizado de una probeta, se observa y fotografía el flanco, luego se desmonta la probeta, se miden las rugosidades de la parte cilindrada, se instala una probeta nueva y se repite el procedimiento hasta que se observe desgastes de flanco del orden de 0,7mm.

## **Etapas 6. Procesar la información entrada /salida.**

### **Actividad 6.1: Recolectar, organizar y compilar información de entrada/salida.**

Tras la ejecución del ensayo, todos los datos obtenidos fueron almacenados en aplicativos de software, para procesar los datos que serán incluidos en los formatos correspondientes para cada medición.

Los aplicativos que se utilizaron fueron los siguientes:

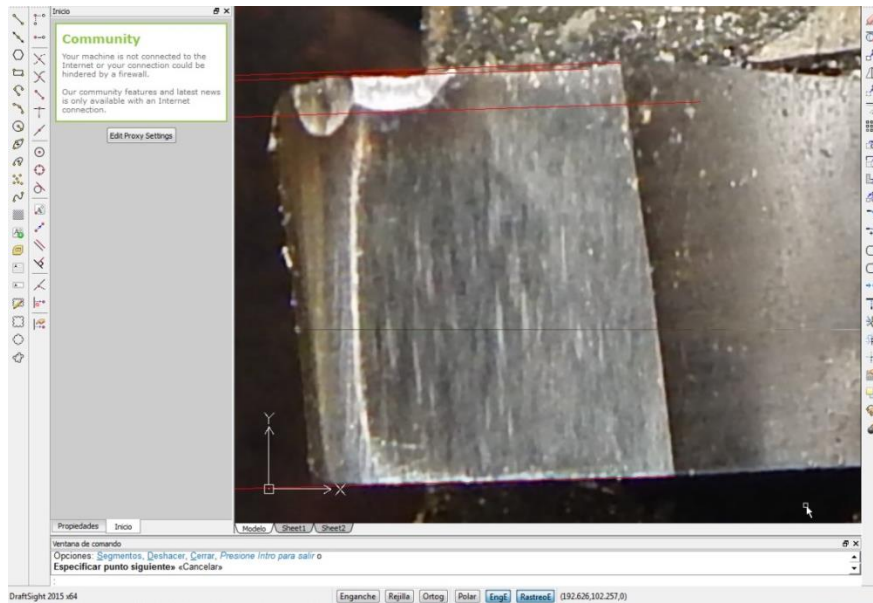
- *DSP data managment*. Utilizado para procesar la información acerca de las vibraciones que se le tomaron a la máquina
- *Draftsight 2015*. Utilizado para la medición de la altura de flanco en la herramienta
- Hoja electrónica *Excel*. En ella que se almacenó la información y se graficaron las curvas de desgaste de flanco.

### **Actividad 6.2: Análisis de datos obtenidos.**

Lo que se desea lograr con este estudio es determinar el desgaste de flanco y la vida útil de la herramienta de corte de acero rapido HSS, asistido o no con los pulsos de alta densidad de corriente.

Como se precisó en 6.1, la medición del desgaste de flanco se efectuó con el software *Draftsight 2015*. La figura 20, presenta un vistazo rápido de la obtención de dicha altura.

**Figura 31.** Medición del desgaste de flanco con el software *Draftsight 2015*.



FUENTE: Montilla M., Carlos Alberto

**Etaapa 7. Presentar la información de variación del desgaste de flanco, con y sin asistencia de pulsos de corriente de alta densidad**

**Actividad 7.1: Desarrollar un informe con todos los datos conseguidos.**

En las figuras 32 y 33 se aprecia toda la información necesaria obtenida en el proceso de experimentación.

**Figura 32: Información HSS-S EPT**

Probeta	Rugosidad promedio	Lectura vibración	Foto	Hora ensayo	Vibración radial (mm/s)		Vibración axial (mm/s)		Altura UCAD	Flanco UCAD	hf (mm)	T (min)
					RMS	Pico	RMS	Pico				
					captador C1		captador C2					
1A	6,18	14:09	5328	1:59	0,06	0,13	0,06	0,11	No	No	No	0,6075
2A	6,38	14:20	5333	2:10	0,05	0,18	0,05	0,13	42,80	1,72	0,31	1,22
3A	6,30	14:28	5334	2:17	0,06	0,11	0,03	0,10	No	No	No	1,83
4A	6,85	14:31	5336	2:20	0,07	0,19	0,05	0,20	No	No	No	2,44
5A	7,84	14:35	5337	2:25	0,06	0,15	0,05	0,14	No	No	No	3,05
6A	7,76	14:39	5338	2:29	0,06	0,16	0,06	0,20	No	No	No	3,66
7A	7,41	14:42	5339	2:32	0,05	0,13	0,07	0,29	No	No	No	4,27
8A	6,91	14:45	5342	2:34	0,06	0,14	0,06	0,27	No	No	No	4,88
9A	7,30	14:48	5344	2:36	0,06	0,15	0,08	0,22	No	No	No	5,49
10A	7,50	14:51	5348	2:40	0,07	0,19	0,07	0,25	33,90	1,75	0,40	6,10

## ANEXO 1

**Figura 33:** Información HSS – EPT

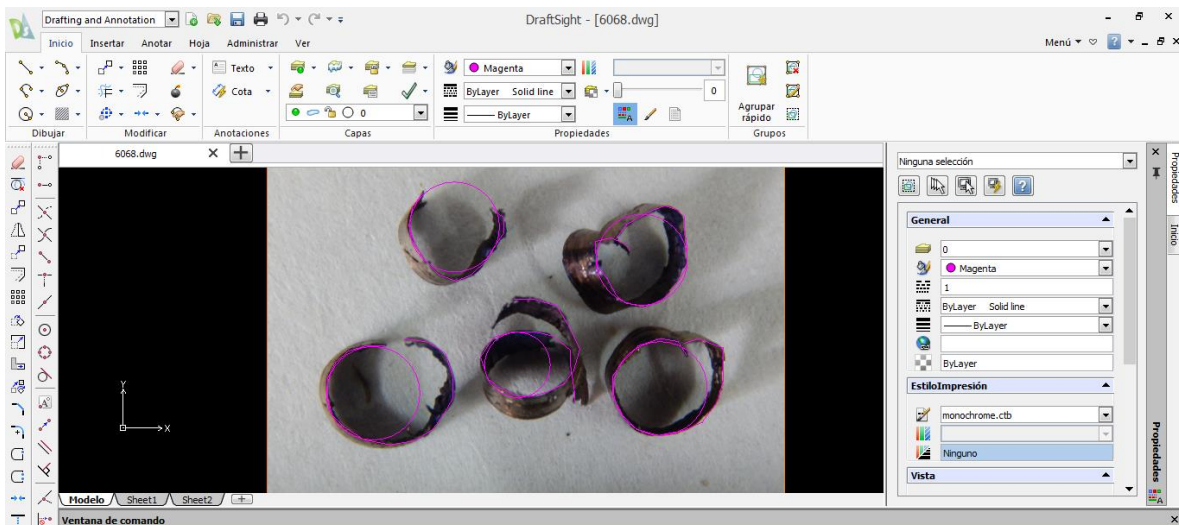
Probeta	Rugosidad promedio	Lectura vibración	Foto	Vibración radial (mm/s)		Vibración axial (mm/s)		Altura UCAD	Flanco UCAD	hf (mm)	T (min)
				RMS	Pico	RMS	Pico				
1C	5,00	8:22	5650	0,03	0,06	0,02	0,04	No	No	No	0,6074
2C	6,36	8:35	5652	0,04	0,18	0,07	0,33	27,57	1,38	0,39	1,21
3C	5,73	8:38	5653	0,03	0,10	0,07	0,30	28,59	1,36	0,37	1,82
4C	5,86	8:42	5654	0,03	0,10	0,08	0,11	NO	NO	NO	2,43
5C	5,72	8:47	5656	0,04	0,20	0,08	0,31	29,60	1,58	0,42	3,04
6C	6,05	8:51	5657	0,03	0,09	0,08	0,30	NO	NO	NO	3,64
7C	5,80	8:55	5658	0,03	0,08	0,08	0,28	24,58	1,80	0,57	4,25
8C	5,73	8:58	5659	0,04	0,18	0,08	0,39	NO	NO	NO	4,86
9C	5,69	9:01	5660	0,03	0,10	0,07	0,30	NO	NO	NO	5,47
10C	8,52	9:05	5661	0,04	0,17	0,10	0,44	NO	NO	NO	6,07

## ANEXO 2

### Etaa 7. Tomar mediciones a las virutas, para calcular la relación de viruta

En la figura 33 se aprecia un pantallazo del software *Draftsight*, durante el proceso de recopilación de información de longitudes exteriores y radio.

**Figura 34.** Proceso de medición de virutas en el software *Draftsight*



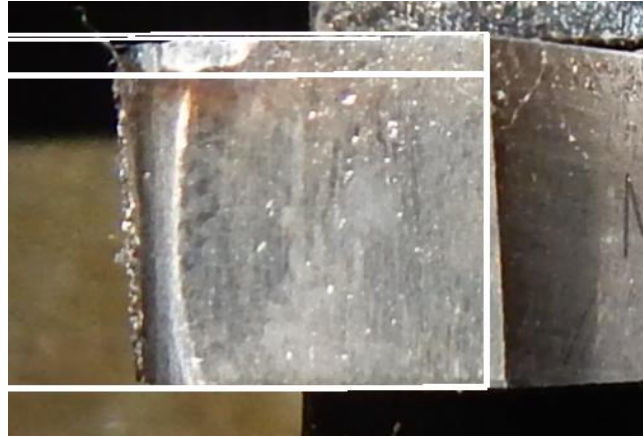
## Actividad 7.2: Resultados y Análisis

### 7.2.1: Desgaste de flanco

Con el fin de discriminar los cambios en las dimensiones en la medición óptica del desgaste de flanco  $V_B$  se utilizó una cámara Nikon L830 y software Draftsight 2015. Se tomaron fotos a la cara de incidencia una vez concluido el mecanizado de cada probeta a una distancia fija y repetible.

Una vez culminadas algunas pruebas se usaron las imágenes correspondientes para proyectar los bordes superior e inferior de la herramienta de corte (figura 35), así, con el fin de ubicar el  $V_B$ .

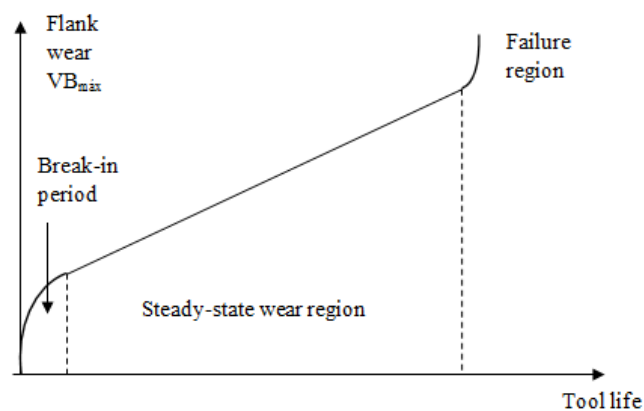
**Figura 35:** Medición del desgaste de flanco HSS



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

Según Groover (2015), Kalpakjian (2002) y Bhattacharyya (1984), la evolución típica del desgaste de flanco versus la vida de la herramienta, es el mostrado en la figura 36. La región de entrada (*break-in period*) se caracteriza por un desgaste inicial rápido; la *steady-state wear region*, se caracteriza por la ocurrencia de una velocidad de desgaste uniforme y por último, la *failure region* se caracteriza por la aceleración de la velocidad de desgaste, hasta ocurrir la falla final.

**Figura 36:** Comportamiento típico de desgaste de flanco de una herramienta por arranque de viruta.



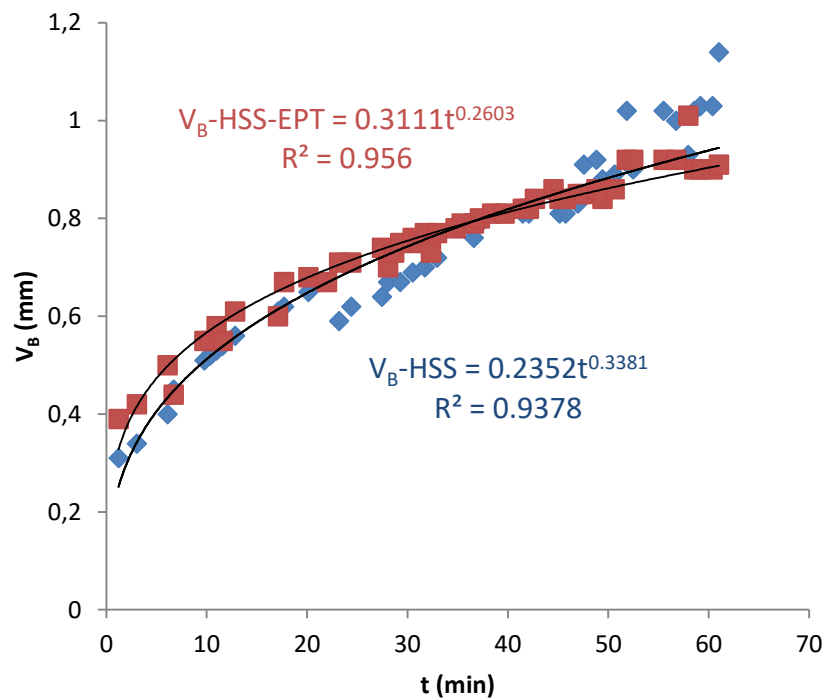
**FUENTE:** Mikell P. Groover [42]

Como se muestra en la figura 37 en la utilización de una herramienta de corte HSS, se puede observar el desgaste de flanco en un mecanizado convencional como también el estudiado por asistencia de pulsos de corriente. Podemos observar que la evolución con el tiempo el desgaste de flanco que experimenta, corresponde con el comportamiento descrito

por Groover (2015), Kalpakjian (2002) y Bhtattacharyya (1984), quienes explican y demuestran las tres etapas de comportamiento de la herramienta de corte.

En unos reportes sobre comportamiento de desgaste de flanco, fueron equivalentes en forma a las figuras 34 y 35. Fueron los trabajos en procesos de torneado convencional, Seemuang y otros (2016) y Wang y otros (2014), en ensayos realizados, el comportamiento del desgaste  $V_B$  obedece a los modelos de potencia, en ambas condiciones de ensayo con coeficientes de determinación superiores a 0,93.

**Figura 37:** Desgaste de flanco en herramienta HSS



**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

## 7.2.2: Vibraciones y Rugosidad Superficial

Tanto para los mecanizados convencional y asistido por electropulsos, las vibraciones se miden en dirección radial y axial. En la tabla 5 se muestran los resultados de rugosidad media  $R_a$  y desviación estándar para valores de RMS y pico máximo de aceleración para la herramienta HSS.

**Tabla 5:** Resultados de rugosidad media Ra y desviación estándar para vibración y acabado superficial en superficie HSS

		HSS	HSS-EPT
<b>Vibración pico (mm/s)</b>	Radial	0.154 ± 0.028	0.127 ± 0.032
	Axial	0.286 ± 0.082	0.224 ± 0.104
<b>Vibración RMS (mm/s)</b>	Radial	0.059 ± 0,01	0.038 ± 0.008
	Axial	0.080 ± 0.022	0.057 ± 0,019
<b>Rugosidad media (μm)</b>		9.881 ± 2.034	9.093 ± 1,510

**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

En el caso de torneado con herramienta HSS cuando es asistido con electropulsos, los valores de rugosidades medias Ra y de vibración radial y axial (RMS y pico) son inferiores a las obtenidas en el proceso de torneado convencional. En el mecanizado asistido por pulsos produce una disminución significativa en la vibración durante el arranque de viruta y según análisis de varianza ANOVA con *p-value* de 0.000, corresponden a diferentes poblaciones.

En cuanto la tabla 5, podemos observar la rugosidad media de un material mecanizado con herramienta HSS disminuye cuando el proceso es asistido, y un análisis de varianza ANOVA con *p-value* de 0,003 indica que corresponden a poblaciones diferentes.

En la tabla 6 se presentan los resultados de anchos, espesores y áreas de las virutas, así como de la relación de viruta (chip ratio).

**Tabla 6:** Resultados de espesores de viruta

Parámetro	<i>Uncut chip thickness</i> $t_0$ (mm)	<i>uncut chip width</i> $W_0$ (mm)	<i>Thickness chip</i> $t_c$ (mm)	<i>Width chip</i> $W_c$ (mm)	<i>Chip ratio</i> $r$	<i>Chip area</i> (mm <sup>2</sup> )
Condición de ensayo						
HSS	0.09	1.56	0.336 +/- 0.037	2.116 +/- 0.286	0.267	0.70
HSS-EPT			0.192 +/- 0.012	1.924 +/- 0.129	0.465	0.37

**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

Para la relación de viruta (chip ratio) se usó la fórmula (21).

$$r_c = \frac{t_0}{t_c} \quad (21)$$

Donde:

$t_0$ , es el espesor de la viruta sin recalcar (*uncut chip thickness*) (mm)

$t_1$ , es el espesor de la viruta recalcada (*chip thickness*) (mm)

$r_c$ , es la relación de viruta (chip ratio)



En la figura 38 se aprecia la forma de las virutas obtenidas en el proceso de torneado, con y sin la asistencia de electropulsos.

**Figura 38:** Esta viruta hecha por un proceso de torneado con buril HSS que se obtuvo de este trabajo.



**Fuente:** Montilla M., Carlos Alberto

De acuerdo a la norma ANSI/ASME B94.55M (figura 39), las virutas obtenidas corresponden al tipo *continuos chip*, type 5, conical helical.

**Figura 39:** Tipos de viruta obtenidas en torneado, de acuerdo a norma ANSI/ASME B94.55M

1 RIBBON CHIPS*	2 TUBULAR CHIPS*	3 SPIRAL CHIPS	4 WASHER-TYPE HELICAL CHIPS*	5 CONICAL HELICAL CHIPS*	6 ARC CHIPS**	7 ELEMENTAL CHIPS	8 NEEDLE CHIPS
1.1 Long	2.1 Long	3.1 Flat	4.1 Long	5.1 Long	6.1 Connected		
1.2 Short	2.2 Short	3.2 Conical	4.2 Short	5.2 Short	6.2 Loose		
1.3 Snarled	2.3 Snarled		4.3 Snarled	5.3 Snarled			

En la tabla 7 se presentan los resultados de longitud exterior y diámetro exterior de las virutas. Los análisis de varianza ANOVA indican que no hubo cambios significativos en estas dimensiones, en función de que el proceso de torneado hubiese sido asistido o no electropulsos.



**Tabla 7:** Dimensiones de viruta recalcada

<b>Parámetro</b>	<b>Outer length of chip (mm)</b>	<b>Outside diameter (mm)</b>
<b>Condición de ensayo</b>		
<b>HSS</b>	54.710 +/- 7.890	3.368 +/- 0.627
<b>HSS EPT</b>	60.010 +/- 13.840	3.225 +/- 0.587

**FUENTE:** Montilla M., Carlos Alberto

## **6. CONCLUSIONES**

Ya culminado este estudio, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se definió un protocolo de experimentación en cuanto a variables de entrada: material (tipo, tamaño y forma) a mecanizar, velocidad de rotación, profundidad de corte, velocidad de avance, ancho de pulsos, frecuencia de pulsos.
- Se definió un protocolo de experimentación en cuanto a variables de salida: vibraciones pico radial y axial, acabado superficial de la pieza y desgaste de flanco.
- Se prepararon las probetas e instrumentación necesaria para la experimentación.
- Se ejecutaron las pruebas preliminares.
- Se desarrolló la experimentación y se registraron las correspondientes lecturas.
- Se procesó la información entrada /salida.
- Se estudió el efecto de los pulsos de alta densidad de corriente sobre el desgaste de flanco en un buril de acero rápido HSS.
- Los modelos matemáticos que describen el comportamiento de los desgastes de flanco  $V_B$  corresponden a modelos de potencia, con coeficientes de determinación superiores a 0,93.
- En edades tempranas de los ensayos, los desgastes de flanco son menores cuando el proceso de torneado no se asiste con electropulsos. En las edades últimas de los ensayos el comportamiento se invierte.

- Las comparaciones de las vibraciones indican sus valores son menores si el proceso de torneado ha sido asistido con electropulsos.
- Al torneear el material 1045 con asistencia de electropulsos, el acabado superficial dado por la herramienta HSS, mejora considerablemente, en comparación con el mecanizado convencional.
- Las virutas obtenidas corresponden *continuos chip, type 5, conical helical*. Las metrologías efectuadas a las virutas muestran que las longitudes externas y diámetros externos de las virutas son mayores en las probetas torneadas con la asistencia de electropulsos.
- Se presentan cambios significativos en la relación de viruta (chip ratio), indicando que la asistencia del proceso de torneado con electropulsos conlleva incrementos en la maquinabilidad.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Montilla M., Carlos Alberto. “*Estudio y aplicación del fenómeno de la electroplasticidad en procesos de torneado de metales*”. Proyecto de tesis doctoral. Universidad Tecnológica de Pereira. Doctorado en Ingeniería. 2015.
- [2] Antonio J. Sánchez Egea, Hernán A. González Rojas, Carlos Alberto Montilla M., Valentina Kallewaard. “*Manufacturing improves when turning process is assisted in situ by short time electropulsing*”. Journal of Materials Processing Technology 222 (2015) 327–334.
- [3] Ponencia en el *Second International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology - AMDM 2014*. “Estudio de la variación de la rugosidad y dureza superficial en piezas torneadas, con la asistencia de electroplasticidad”. Autores: Carlos Alberto Montilla M., Valentina Kallewaard E., Antonio J. Sánchez Egea, Hernán A. González Rojas. Bogotá, septiembre 22 al 24 de 2014.
- [4] Poster y ponencia: “*Turning process assisted in situ by short time current pulses*”. Publicado en Procedia Engineering, del Manufacturing Engineering Society International Conference MESIC 2015, Barcelona, 22 al 24 de Julio de 2015. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/procedia](http://www.elsevier.com/locate/procedia).
- [5] Chandrasekaran, Kamaraj. Marimuthu, P. Raja, K. Machining Performance of TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Multilayer and B-TiC Nano Multilayer Coated Inserts on Martensitic Stainless Steel in CNC Turning. *Emerging Trends in Science, Engineering and Technology*, Lecture Notes in Mechanical Engineering. India 2012.
- [6] Khamel, Samir. Ouelaa, Nouredine. Bouacha, Khaider. Analysis and prediction of tool wear, surface roughness and cutting forces in hard turning with CBN tool. Department of Industrial Maintenance, Mohamed Cherif Messaadia University, P.O. Box 1553, Souk Ahras 41000, Algeria Laboratory of Mechanics and Structures (LMS), 8 May 1945 University, P.O. Box 401, Guelma 24000, Algeria. 2011.
- [7] Zou, Bin. Chen, Ming. Li, Shasha. Study on finish-turning of NiCr20TiAl nickel-based alloy using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN-coated carbide tools. Int J Adv Manuf Technol. 2011.
- [8] Aouici, Hamdi. Yallese, Mohamed Athmane. Fnides, Brahim. Chaoui, Kamel. Mabrouki, Tarek. Modeling and optimization of hard turning of X38CrMoV5-1 steel with CBN tool: Machining parameters effects on flank wear and surface roughness. 2010.
- [9] Jun, Seong-Chan. Lubrication Effect of Liquid Nitrogen in Cryogenic Machining Friction on the Tool-chip Interface *Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.)*, Vol 19, No. 4, pp. 936~94~ 2005
- [10] Kohlhoff, Tim. Solter, Jens. Brinksmeier, Ekkard. Influence of the turning process on the distortion of disks for gear manufacture. Manufacturing Technologies, Foundation Institute of Material Science (IWT), Badgasteiner Str. 3, 28359 Bremen, Germany. 2011.

- [11] Nowag, Lutz. Solter, Jens. Brinksmeier, Ekkard. Influence of turning parameters on distortion of bearing rings. German Academic Society for Production Engineering (WGP). 2007
- [12] Li, Wen. Zein, André. Kara, Sami. Herrmann, Christoph. Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools. Proceedings of the 18th CIRP International 268 Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011.
- [13] Jawahir, I.S. Jayal, A.D. Product and Process Innovation for Modeling of Sustainable Machining Processes. Institute for Sustainable Manufacturing, University of Kentucky, Lexington, USA. Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing, 2011.
- [14] Neugebauer, R. Wertheim, R. Harzbecker, C. Energy and Resources Efficiency in the Metal Cutting Industry. Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology, Chemnitz, Germany. Faculty of Mechanical Engineering, Institute for Machine Tools and Forming Technology, Technical University Chemnitz, Germany. 2011.
- [15] Rajemi, M.F. Mativenga, P.T.A. Aramcharoen. Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, the University of Manchester. Journal of Cleaner Production 18 (2010) 1059–1065.
- [16] Ji, Renjie. Liu, Yonghong. Zhang, Yanzhen. Dong, Xin. Chen, Zhili. Cai, Baoping. Experimental research on machining characteristics of SiC ceramic with end electric discharge milling. Journal of Mechanical Science and Technology 25 (6) (2011) 1535~1542
- [17] Pa, P. S. Design of continuity processes of electrochemical finishing and grinding following turning. Journal of Mechanical Science and Technology 22 (2008) 2197~2202.
- [18] Pa, P.S. Design of freeform surface finish using burnishing assistance following electrochemical finishing. Journal of Mechanical Science and Technology 21 (2007) 1630-1636
- [19] Newman, Duane C. Novel uses of electric fields and electric currents in powder metal (P/M) processing. Elsevier. Materials Science and Engineering A287 (2000) 198–204
- [20] NORMA ISO 3002/1 (Equivalente UNE 16-149). *Geometry of the active part of cutting tools - General terms, reference Systems, tool and working angles, chip breakers.*
- [21] Callister WD Jr (2000) Materials science and engineering an introduction, 5th edn. Wiley, New York.
- [22] Jones JJ, Mears L (2010) Empirical modeling of the stress-strain relationship for an upsetting process under direct electrical current. Trans North Am Manuf Res Inst SME 38.
- [23] Salandro WA (2012) Thermo-mechanical modeling of the electrically-assisted manufacturing (EAM) technique during open die forging. PhD dissertation, Clemson University.

- [24] Salandro WA, Jones JJ, McNeal TA, Roth JT, Hong ST, Smith MT (2008) Effect of electrical pulsing on various heat treatments of 5xxx series aluminum alloys. In: ASME international manufacturing science and engineering conference, Evanston, IL, 2008, p 10.
- [25] Roth JT, Loker I, Mauck D, Warner M, Golovashchenko SF, Krause A (2008) Enhanced Formability of 5754 Aluminum Sheet Metal Using Electric Pulsing. Trans North Am Manuf Res Inst SME 36:405–412
- [26] Kravchenko V (1966) Influence of electrons in delaying dislocation in metals. JETP (USSR) 51
- [27] Conrad H (2002) thermally activated plastic flow of metals and ceramics with an electric field or current. Mater Sci Eng A322:100–107
- [28] Kino T, Endo T, Kawata S (1974) Deviations from Matthiessen's rule of the electrical resistivity of dislocations in Aluminum. J Phys Soc Japan 36(3).
- [29] Suo Z (2003) Reliability of interconnect structures, pp 265–324. In: Gerberich W, Yang W (Eds) Volume 8: Interfacial and nanoscale failure. Milne I, Ritchie RO, Karihaloo B (Editors-in-Chief) Comprehensive structural integrity. Elsevier, Amsterdam.
- [30] Hall EO (1951) Proc Phys Soc B64.
- [31] Kocks UF (1966) A statistical theory of flow stress and work hardening. Phil Mag 13.
- [32] Ross CD, Kronenberger TJ, Roth JT (2009) Effect of DC on the formability of Ti-6AL-4V. J Eng Mater Technol 131(3):11
- [33] Troitskii OA (1969) electromechanical effects in metals. Pis'ma Zhurn Experim Teoret Fiz (10):118
- [34] Okazaki K, Kagwa M, Conrad H (1978) a study of the electroplastic effects in metals. Scr Metall 12:1063–1068
- [35] Jones JJ, Roth JT (2009) Effect on the forgeability of Magnesium AZ31B-O when a continuous DC electrical current is applied. In: ASME international manufacturing science and engineering conference, West Lafayette, IN, 2009, p 10
- [36] Salandro WA, Khalifa A, Roth JT (2009) tensile formability enhancement of Magnesium AZ31B-O alloy using electrical pulsing. Trans North Am Manuf Res Inst SME 37.
- [37] Perkins TA, Kronenberger TJ, Roth JT (2007) Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working. J Manuf Sci Eng 129(1):84–94.
- [38] Green CR, McNeal TA, Roth JT (2009) Springback elimination for Al-6111 alloys using electrically-assisted manufacturing (EAM). Trans North Am Manuf Res Inst SME 37.
- [39] ANSI/ASME B94.55M (1985) Tool life testing with single-point turning tools. B94.55M-1985. ASME, New York.

**[40]** Calle Trujillo, Gabriel. Mecánica del corte de metales. Notas de clase. Universidad Tecnológica de Pereira. 2005.

**[41]** Wesley A. Salandro, Joshua J. Jones, Cristina Bunget, Laine Mears, John T. Roth. *“Formación Asistida Eléctricamente (control y medida)”* International Center for Automotive Research, Clemson University, Greenville, SC, USA. Behrend School of Engineering Penn State Behrend, Erie, PA, USA. Switzerland 2015

**[42]** Mikell P. Groover, “Fundamentos de manufactura moderna” Lehigh Univesity. 2007